

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT**

**PAR
SABRINA CHARRON**

**INFLUENCE DES SAISONS SUR LA RELATION ENTRE
LES INDICES CLIMATIQUES ET LA MAGNITUDE DES CRUES
AU QUÉBEC MÉRIDIONAL**

AVRIL 2009

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord mon directeur de recherche, Docteur Ali A. Assani, sans qui ce projet n'aurait jamais été mené à terme. Merci de votre dévouement, votre confiance et votre soutien qui m'ont été indispensables durant toutes ces années et qui m'ont permis de surmonter les obstacles rencontrés.

Un merci particulier à Madame Farida Bouchelouh pour ses précieux conseils, pour son écoute et sa grande compréhension. Merci de m'avoir guidée vers la bonne voie.

En terminant, merci infiniment à mon entourage, ma famille et mes amis, pour toutes ces années d'appui irremplaçable. Je ne vous remercierai jamais assez d'avoir traversé ces années avec moi.

RÉSUMÉ

Ce projet traite de l'influence des saisons sur la relation entre les indices climatiques et les caractéristiques de crues au Québec méridional. L'étude consiste à comparer les modes de variabilité, la variabilité interannuelle et interdécennale et la relation entre les indices climatiques et les crues mesurées au printemps (avril à juin) et en automne (août à octobre). Pour atteindre ces objectifs, nous avons appliqué les méthodes statistiques suivantes : Analyse en composantes principales, Régression linéaire, Test de Mann-Kendall, Moyennes mobiles glissantes et Analyse canonique des corrélations. Ces différentes méthodes nous ont permis de mettre en évidence des résultats originaux sur la différence qui existe entre les crues printanières et les crues automnales.

En ce qui concerne les modes de variabilité de fortes crues, trois modes ont été identifiés au printemps et en automne : deux en rive sud et un seul en rive nord. Toutefois, la composition de ces modes varie en fonction des saisons. Quant à la variabilité temporelle de fortes crues, seul le mode de la rive nord est caractérisé par une hausse significative de débits. Enfin, en ce qui concerne la relation entre les indices climatiques et les fortes crues, cette relation varie selon les saisons.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ii
RÉSUMÉ	iii
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE, PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE RECHERCHE	3
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	6
2.1. Sources des données	6
2.1.1. Les données des débits de crues.....	6
2.1.2. Les données des indices climatiques	9
2.2. Constitution des séries hydrologiques saisonnières analysées	11
2.3. Méthodes statistiques d'analyse de donnée	11
2.3.1. Détermination des modes de variabilité temporelle des crues	11
2.3.2. Analyse de la variabilité temporelle des caractéristiques de crues....	12
2.3.3. Analyse des corrélations	15
2.3.3.1. Corrélations simples.....	15
2.3.3.2. Corrélations canoniques.....	15
CHAPITRE 3 ANALYSES ET RÉSULTATS	17
3.1. Mode de variabilité temporelle des crues printanières et automnales.....	17
3.2. Comparaison de la variabilité interannuelle des débits de crues printanières et automnales.....	23

3.3. Comparaison de la variabilité interdécennale des débits de crues printanières et automnales.....	31
3.4. Corrélation entre les crues saisonnières	37
3.5. Analyse de la relation entre les crues saisonnières et les indices climatiques au moyen de l'analyse canonique des corrélations.....	38
3.6. Choix des indices climatiques pertinents pour prédire la variabilité temporelle des crues printanières et automnales.....	44
CHAPITRE 4 DISCUSSION	51
4.1. Comparaison des modes de variabilité temporelle des précipitations et des débits au Québec méridional.....	51
4.2. Variabilité temporelle des crues printanières et automnales.....	53
4.3. L'analyse des facteurs de genèse des fortes crues printanières et automnales et leur relation avec les indices climatiques.....	54
4.3.1. L'humidité atmosphérique	54
4.3.2. La structure verticale de l'atmosphère.....	55
4.3.3. La température	56
4.3.4. Les états de surface et l'usage des sols.....	57
4.4. Relation entre les indices climatiques et la variabilité temporelle des fortes crues au printemps et en automne au Québec méridional.....	58
CHAPITRE 5 CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	62
BIBLIOGRAPHIE	63

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Rivières sélectionnées pour l'analyse	8
2.2	Les indices climatiques analysés	10
3.1	Saturations des rivières sur les composantes principales significatives après rotation d'axes par la méthode varimax pour les crues printanières	19
3.2	Saturations des rivières sur les composantes principales significatives après rotation d'axes par la méthode varimax pour les crues automnales	20
3.3	Comparaison des valeurs de Qvp des composantes principales au printemps et en automne	24
3.4	Paramètres des équations de régression linéaire ajustées sur les notes factorielles des composantes principales au printemps et en automne ...	25
3.5	Coefficients de corrélation entre les crues printanières et automnales dans les mêmes régions géographiques	37
3.6	Valeurs des coefficients canoniques de corrélation	39
3.7	Coefficients de structure calculés entre les crues printanières (composantes principales) et les indices climatiques automnaux.....	41
3.8	Synthèse sur la relation entre les crues et les indices climatiques. Résultats de l'analyse canonique des corrélations	43
3.9	Coefficients de corrélation calculés entre les indices climatiques et les débits de crues de rivières au printemps	46

LISTE DES FIGURES

2.1	Localisation des stations.....	7
3.1	Localisation des modes de variabilité temporelle des crues printanières.	21
3.2	Localisation des modes de variabilité temporelle des crues automnales.	22
3.3	Variabilité interannuelle des notes factorielles des composantes principales. Crues printanières.....	26
3.4	Variabilité interannuelle des notes factorielles des composantes principales. Crues automnales.....	27
3.5	Variabilité interannuelle des notes factorielles des composantes principales extraites des crues printanières. Application du test de Mann-Kendall.....	29
3.6	Variabilité interannuelle des notes factorielles des composantes principales extraites des crues automnales. Application du test de Mann-Kendall.....	30
3.7	Comparaison de succession des périodes sèches et humides des crues printanières et automnales pour les rivières corrélées à CP I (Centre de la rive sud).	33
3.8	Comparaison de succession des périodes sèches et humides des crues printanières et automnales pour les rivières corrélées à CP II (rive nord).....	34
3.9	Comparaison de succession des périodes sèches et humides des crues printanières et automnales pour les rivières corrélées à CP III (Nord de la rive sud).	35
3.10	Succession des périodes sèches et humides des crues printanières pour les rivières corrélées à CP III (Région sud de la rive sud).	36
3.11	Comparaison de la variabilité interdécennale des crues et des indices climatiques les mieux corrélés aux crues. Cas de la rivière Chateauguay. a = crues printanières; b = indice OPD hivernal, c = crues automnales; d = indice OAM hivernal.....	47

- 3.12 Comparaison de la variabilité interdécennale des crues et des indices climatiques les mieux corrélés aux crues. Cas de la rivière Du Sud.
a = crues printanières; b = indice OA estival, c = crues automnales;
d = indice OPD hivernal 48
- 3.13 Comparaison de la variabilité interdécennale des crues et des indices climatiques les mieux corrélés aux crues. Cas de la rivière Matane.
a = crues printanières; b = indice ONA hivernal, c = crues automnales;
d = indice OPD hivernal 49
- 3.14 Comparaison de la variabilité interdécennale des crues et des indices climatiques les mieux corrélés aux crues. Cas de la rivière Vermillon.
a = crues printanières; b = indice OAM hivernal, c = crues automnales;
d = indice ONA printanier 50

INTRODUCTION

Chaque année, le ministère de la Sécurité civile du Québec doit intervenir dans les cas de débordement des rivières. En effet, au Québec de nombreuses rivières sortent de leur lit et menacent les populations riveraines. Ces débordements sont induits par les crues des rivières, qui apparaissent maintenant à différents moments de l'année malgré le fait que ce cycle annuel est caractérisé par une succession des périodes de crues et d'étiages. Cette succession permet de maintenir l'intégrité écologique des écosystèmes aquatiques. Pour assurer cette intégrité, chaque période joue un rôle spécifique dans le fonctionnement de ces écosystèmes. Cependant, la période la plus importante est sans nul doute celle des crues. Celles-ci sont responsables de tous les changements observés dans le fonctionnement et l'évolution des écosystèmes aquatiques. En effet, c'est durant les crues que se produisent le transport des sédiments, l'érosion des berges, la connexion entre le lit mineur et les milieux adjacents (plaines alluviales et versants). De plus, elles assurent la survie de la race humaine par l'apport de l'eau et des nutriments pour la fertilisation des champs.

Cependant, malgré ces rôles bénéfiques, les crues sont aussi responsables des dégâts socio-économiques. À ce propos, tous les modèles climatiques concordent sur l'aggravation de ces dégâts comme conséquence du réchauffement climatique en raison, entre autres, de la hausse de l'intensité et de la fréquence de crues (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001).

En raison de ces multiples rôles, c'est sans surprise que de nombreux travaux sont déjà consacrés à l'analyse de différents aspects de crues dans le monde, c'est-à-dire leurs causes, leur estimation ou prévision, leur variabilité spatio-temporelle, leurs impacts morphologiques et écologiques ainsi qu'anthropiques, la problématique de leur gestion, etc.

Au Québec, les travaux relatifs aux crues se sont limités seulement à l'analyse des débits maximums annuels. Ils se sont penchés sur les aspects suivants :

- l'estimation des débits maximums annuels au moyen de l'analyse régionale ou des lois statistiques (Anctil et Mathevet, 2004; Anctil et al., 1998; Ashkar et Rousselle, 1981; Cavadias, 1990; Daviau et al., 2000; Desforges et Tremblay, 1974; El-Jabi et al., 1986; Gingras et al., 1994; Grehys, 1996a, 1996b; Haché et al., 2002; Hoang, 1977, 1978; Ouarda et al., 1999, Ribeiro-Corréa et al., 1995);
- l'analyse de la variabilité spatio-temporelle des séries annuelles maximums afin de détecter les signaux induits par le réchauffement climatique ou les activités anthropiques (Yue et al., 2001 ; Zhang et al., 2001) ;
- la prévision de l'intensité des crues selon les différents scénarios du réchauffement climatique (Roy et al., 2001) ;
- les impacts de barrages hydroélectriques sur les caractéristiques de débits maximums annuels (Assani et al., 2005; Fortier et al., 2008).

Les pages qui suivent tenteront de déterminer l'importance de l'influence des saisons sur les régimes de crue.

CHAPITRE 1

CONTEXTE, PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET HYPOTHÈSE DE RECHERCHE

Toutes les études réalisées au Québec, énumérées dans l'introduction, se sont limitées à aborder l'analyse des débits maximums annuels. Cette approche présente plusieurs faiblesses :

(i) Elle ne tient pas compte de tous les débits d'une crue, d'une part, et les débits de toutes les crues survenues au cours d'une année, d'autre part. Or, les impacts environnementaux provoqués par les crues ne dépendent pas du débit maximum le plus élevé survenu au cours d'une année.

(ii) Elle ne tient pas compte de la saison d'occurrence de crues. Or, les impacts environnementaux provoqués par les crues varient en fonction des saisons. Ainsi, la même crue peut engendrer des impacts environnementaux différents selon les saisons.

(iii) Elle ne permet pas de déterminer tous les facteurs climatiques qui influencent la variabilité spatio-temporelle des crues. En effet, en considérant seulement une seule valeur des débits par année (série annuelle des débits), on mêle les débits de diverses origines (crue ou étiage). De ce fait, il devient difficile de différencier les facteurs climatiques associés à chaque origine de crues.

Par ailleurs, les études consacrées à la variabilité interannuelle des précipitations et de la température au Canada et aux États-Unis durant le siècle passé ont révélé les faits suivants (Groisman et Easterling, 1994; Stone et al., 2000; Zhang et al., 2000):

(i) Les précipitations totales annuelles ont significativement augmenté au sud du 55e parallèle depuis la seconde moitié du 20e siècle. Cette hausse est due à la hausse des précipitations en automne (Small et al., 2006). En revanche, aucune hausse significative des précipitations n'a été observée en hiver et au printemps au Québec méridional. De plus, en automne, Québec subit les effets résiduels des ouragans du Bassin Atlantique. Ces effets se traduisent par des fortes précipitations et inondations. Or, durant les trente dernières années, on a observé une hausse d'intensité et de la fréquence des ouragans (e.g. Elsner, 2006; Elsner et al., 2006; Emmanuel, 2005; Goldenberg et al., 2001; Hoyos et al., 2006; Landsea, 2005; Pielke, 2005; Shepherd et Knutson, 2006; Walsh, 2004; Webster et al., 2005; Knutson et Tuleya, 2004). Ceci pourrait traduire par une hausse de la fréquence et de la magnitude des crues au Québec en automne en particulier.

(ii) Le rapport des précipitations nivales aux précipitations totales a significativement diminué. Cette diminution a été plus importante en hiver qu'au printemps.

(iii) Une hausse de la fréquence des précipitations de forte intensité notamment.

(iv) Une hausse de la température. Cette hausse a été particulièrement importante en hiver et au printemps. En revanche, aucun réchauffement significatif n'a été observé en automne.

Ces résultats démontrent que les changements des régimes des précipitations et des températures varient selon les saisons. Par conséquent, leurs impacts hydrologiques varient aussi selon les saisons. En ce qui concerne ces impacts, plusieurs travaux ont démontré une occurrence précoce des débits maximums annuels au printemps et une diminution de la magnitude des débits maximums annuels (e.g. Assani et al., 2008a ; 2008b ; Burn et Hag Elnur, 2002).

Cependant, étant donné que les changements des régimes pluviométriques et thermiques varient selon les saisons, l'analyse des impacts de ces changements sur les débits maximums annuels risque de conduire à des conclusions erronées, car les séries annuelles des débits maximums sont constituées des débits mesurés en différentes saisons. Ainsi, les effets des régimes pluviométriques et thermiques survenus en automne sur les crues peuvent être occultés si on se limite à l'analyse des séries annuelles des débits maximums, car ces derniers sont constitués en majorité par des débits printaniers provenant de la fonte des neiges. Pour déterminer l'influence des changements survenus durant les autres saisons sur les régimes de crues, il est donc important d'analyser séparément les saisons. Ainsi, notre projet de recherche poursuit les trois objectifs suivants :

- 1) Comparer les modes de variabilité interannuelle des crues printanières et automnales. Cet objectif repose sur l'hypothèse suivante : le nombre des modes de variabilité temporelle de crues et leur répartition spatiale sont différents au printemps et en automne car les facteurs de genèse de crues diffèrent d'une saison à l'autre.
- 2) Comparer la variabilité interannuelle et interdécennale de la magnitude de crues printanières et automnales. Cet objectif repose sur l'hypothèse suivante : au printemps, en raison de la diminution des précipitations en hiver et au printemps et de la hausse de la température, la variabilité interannuelle des crues printanières, provenant de la fonte des neiges, est caractérisée par une diminution de leur magnitude. En revanche, en automne, en raison de la hausse des précipitations, la variabilité interannuelle des crues est caractérisée, en revanche, par une hausse de leur magnitude, de leur fréquence, de leur durée et de leur variabilité.
- 3) Comparer les facteurs climatiques de la variabilité interannuelle des crues printanières et automnales. L'hypothèse qui sous-tend cet objectif est la suivante : les facteurs climatiques qui influencent la variabilité interannuelle des crues sont différents au printemps et en automne pour la même raison invoquée au point 1.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1 Sources des données

2.1.1. Les données des débits de crues

Le réseau hydrographique du Québec occupe 12 % de la superficie de la province. Il se divise en trois grands bassins versants principaux : Atlantique (37 % des terres drainées), Baie d'Ungava (23% des terres drainées) et Baie d'Hudson (38% de terres drainées). Le bassin versant de l'Atlantique comprend toute la partie méridionale du Québec, c'est-à-dire l'intégralité du fleuve Saint-Laurent. Celui-ci est l'un des plus importants fleuves d'Amérique du Nord. Il prend sa source dans les Grands Lacs et se jette dans l'océan Atlantique. Il draine tout le sud du Québec où il reçoit plus de cent affluents. La vallée du Saint-Laurent est la zone la plus habitée du Québec. La population est établie sur les rives nord et sud du fleuve.

Les données de débits proviennent du CD-Rom HYDAT d'Environnement Canada (2002). La qualité de ces données a déjà été analysée entre autres par Ouarda et al. (1999). Mentionnons que la plupart des rivières retenues dans le cadre de cette étude ont été analysées dans plusieurs travaux (Anctil et Coulibaly, 2004; Ouarda et al., 1999; Coulibaly et Burn, 2004, 2005). Pour les analyses, nous avons retenu treize rivières (tableau 1 et fig.1) dont les données des débits s'étendent sur plus de 50 ans. Pour mieux comparer la variabilité temporelle des débits, nous avons délimité une période commune de mesure des débits pour toutes les rivières. Cette période s'étend de 1934 à 2000.

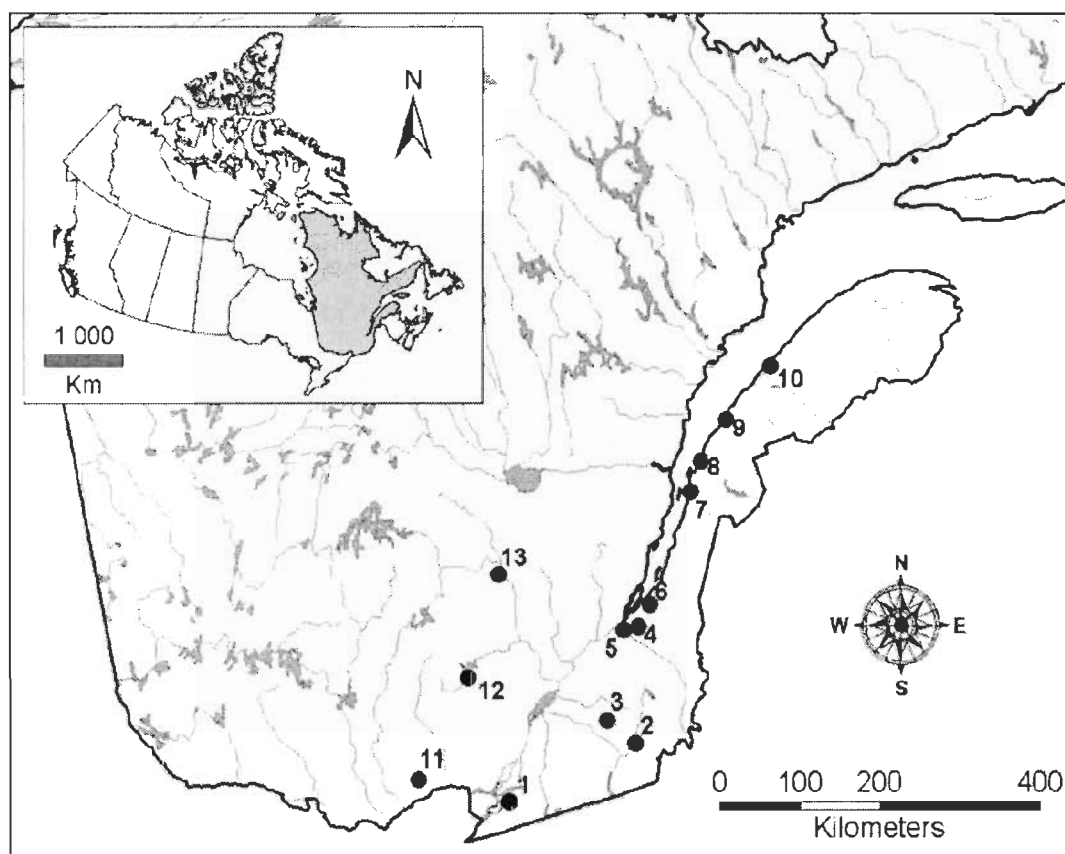


FIGURE 2.1 : Localisation des stations

TABLEAU 2.1
Rivières sélectionnées pour l'analyse

No	Rivières	No. fédéral	Surface (km²)	Latitude (N)	Longitude (W)	DMA* (m³/s)
1	Chateaugay	01OA0001	2500	451710	734810	26.0
2	Eaton	02OE027	642	452802	713915	8.6
3	Nicolet de sud-ouest	02OD001	544	454730	715809	8.4
4	Etchemin	02PH004	1130	463808	710241	21.6
5	Beaurivage	02PJ007	709	463933	711719	10.5
6	Du Sud	02PH010	826	464914	704525	14.7
7	Du Loup	02PG001	1050	474922	693110	15.4
8	Trois-Pistoles	02QA001	932	480521	691147	13.4
9	Rimouski	02QA002	1610	482448	683322	26.5
10	Matane	02QB001	826	484629	673231	33.4
11	De la Petite Nation	02LD005	1330	454730	750529	19.1
12	Matawin	02NF005	1390	464109	735451	22.4
13	Vermillon	02ND001	2670	473920	725746	37.2

*DMA = Débits moyens annuels.

2.1.2. Les données des indices climatiques

En ce qui concerne les indices climatiques, nous en avons retenu cinq : OAM (Oscillation Atlantique Multi-décennale), OA (Oscillation Arctique), ONA (Oscillation Nord Atlantique), OAU (Oscillation Australe), et OPD (Oscillation Pacifique Décennale). En effet, ces indices sont considérés comme facteurs de variabilité temporelle des débits et des précipitations en Amérique du Nord, en général, et au Québec, en particulier (e.g. Anctil et Coulibaly, 2004; Coulibaly et Burn, 2004; 2005; Enfield et al., 2001; Gobena and Gan, 2006; Kingston et al., 2006; McCabe et al., 2004; Sutton et Hodson, 2005). Les données de ces indices ont été tirées des sites internet suivants :

<http://www.cdc.noaa.gov/ClimateIndices/List>. (OAM, OAU, et OPD);

<http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.data.html> (ONA);

<http://jisao.washington.edu/data/ao/> (OA).

Les modes de calcul de ces indices sont résumés au tableau 2.2.

TABLEAU 2.2
Les indices climatiques analysés

Indices	Localisation du phénomène	Mode de calcul des indices
Oscillation atlantique multi décennale (OAM)	Océan Atlantique Nord	Variabilité interannuelle des indices de température de surface de l'océan Atlantique Nord
Oscillation Arctique (OA)	Hémisphère Nord extratropicale	Différence des pressions entre le Pôle Nord et le parallèle de 45°N
Oscillation Nord Atlantique (ONA)	Zone nord-Atlantique extratropicale	Différence de pressions entre le nord (Reykjavik en Islande) et le sud (Ponta Delgada en Espagne) du bassin Atlantique Nord
Oscillation australe (OAU)	Océan austral tropical	Différence de pressions entre le Pacifique austral occidental (Darwin) et le Pacifique austral central (Tahiti)
Oscillation Pacifique décennale (ODP)	Océan Pacifique nord (au du 20°N)	Première composante principale extraite des températures mensuelles de surface océaniques

2.2 Constitution des séries hydrologiques saisonnières analysées

De cette étude, nous nous sommes limitées à la série partielle afin d'éviter l'influence des valeurs extrêmes sur les valeurs des coefficients de corrélation.

On a procédé comme suit :

1) Nous avons constitué une série saisonnière (annuelle) printanière et automnale des débits (série constituée des valeurs des débits les plus élevées mesurées chaque année entre mars et juin, ainsi qu'entre août et octobre).

2) Pour chaque année, nous avons retenu tous les débits dont les valeurs sont supérieures ou égales à Q_m , où Q_m est la plus faible valeur de la série annuelle constituée à l'étape 1. Ainsi, pour chaque année, on a au moins une valeur des débits $\geq Q_m$.

3) Pour chaque année, nous avons calculé les valeurs moyennes de la magnitude des débits sur les séries partielles constituées à partir de Q_m (seconde étape) durant la période 1934-2000. Nous avons constitué deux séries saisonnières de crues au printemps et en automne.

2.3 Méthodes statistiques d'analyse de donnée

2.3.1. Détermination des modes de variabilité temporelle des crues

Pour déterminer les modes de variabilité temporelle des débits, c'est-à-dire regrouper les rivières caractérisées par une variabilité temporelle similaire des débits de fortes crues, on a utilisé l'analyse en composantes principales. Cette méthode statistique (mode S) a été appliquée à la matrice des corrélations (et non à celle de covariance) entre la magnitude des crues au printemps et en automne. L'utilisation des matrices de corrélation, plutôt que des matrices de covariance, permet d'éliminer l'influence des valeurs extrêmes (Bigot et al.

1997) et l'effet provoqué par la variabilité locale d'un site (Siew-Yan-Yu et al. 1998). La rotation d'axes a été effectuée par la méthode Varimax. Cette procédure vise à maximiser les valeurs de saturation des stations sur les composantes principales et à obtenir des régions hydrologiques homogènes (modes) plus stables et physiquement plus robustes. Le regroupement des stations en régions hydrologiques homogènes (modes de variabilité temporelle) a été fondé sur la règle « the maximum loading rule ». Selon cette règle, une station est associée à une composante principale lorsque la valeur de sa saturation est plus élevée sur cette composante que sur les autres (Vicente-Serrano, 2005). Le critère de Kayser (valeur de eigenvalue > 1) a été appliqué pour choisir les composantes principales statistiquement significatives. Il convient de souligner cette méthode est couramment utilisée en climatologie et en hydrologie pour regrouper les stations en régions climatiques ou hydrologiques homogènes du point de vue de la variabilité temporelle des variables hydroclimatiques (e.g. Jain et al., 2005).

2.3.2. Analyse de la variabilité temporelle des caractéristiques de crues

Quatre méthodes seront utilisées pour analyser la variabilité interannuelle et interdécennale de la magnitude des crues printanières et automnales.

(i) La variance permutative. Elle permet de détecter la corrélation sérielle dans les séries hydrologiques. Cette méthode s'appuie sur une mesure de variabilité basée sur la différence entre valeurs consécutives d'une série (Laurencelle, 2001). La variance permutative est un estimateur de la variance lorsque les valeurs consécutives sont indépendantes. Elle est calculée au moyen de la relation suivante :

$$s_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - x_{i+1})^2}{2(n-1)} \quad (1)$$

Où S_p^2 est la variance permutative, x_i , la valeur de l'observation de rang i , x_{i+1} , la valeur de l'observation suivant x_i , n est le nombre total d'observations.

Cette statistique, qui correspond étroitement à la corrélation sérielle, est dotée d'une distribution un peu plus simple. Pour tester l'hypothèse d'indépendance d'une source de variables aléatoires, il suffit en principe d'utiliser n valeurs successives de la variable, de calculer la statistique s_p^2 selon (1), puis de la comparer à une valeur critique. Une valeur significativement basse de s_p^2 indique la présence de corrélation significative des valeurs successives. Les valeurs de s_p^2 ont été tabulées par Laurencelle (2001).

(ii) La régression linéaire. Afin de déterminer si les débits de crue sont affectés par une tendance significative (hausse ou baisse) ou pas, cette méthode a été appliquée aux notes factorielles des composantes principales significatives. La significativité de droites de régression a été testée par la méthode de l'analyse de variance (test classique de Fischer-Snedecor) au moyen de la formule suivante :

$$F_c = R^2 (n - 2) / (1 - R^2) \quad (2)$$

Où R^2 est le coefficient de détermination de la droite de régression.

La droite de régression est significative lorsque la valeur de F_c est supérieure à la valeur critique tirée de la table de Fischer- Snedecor pour un seuil de probabilité donné.

(iii) Le test de Mann-Kendall. Il permet de déceler l'existence d'une unique tendance globale au sein de la série analysée. Son utilisation progressive dans le sens direct et rétrograde, permet de mettre à jour des groupements de petites

ou de grandes valeurs, ou bien encore une croissance ou une décroissance des valeurs prises par les mesures successives de la variable analysée.

Soit x_1, \dots, x_T une séquence de données. A chaque x_i est associé un nombre n_i comptabilisant les éléments x_j tel que $i > j$ et $x_i > x_j$. La statistique s'écrit alors :

$$t = \sum_{i=1}^T n_i \quad (3)$$

Celle-ci, sous l'hypothèse nulle de l'absence de tendance, suit, pour T large, une loi de répartition normale de moyenne et de variance :

$$E(t) = T(T-1)/4 \quad (4)$$

$$\text{Var}(t) = T(T-1)(2T+5)/72 \quad (5)$$

Sa forme réduite est alors :

$$U(t) = [t - E(t)] / \sqrt{\text{var}(t)} \quad (6)$$

Dès lors, pour des amplitudes importantes de la statistique réduite, l'hypothèse nulle sera rejetée. A cette statistique est associée une probabilité de signification, celle de détecter une tendance alors qu'il n'en existe pas. L'application progressive du test, décrite par SNEYERS (1975), permet de déterminer de manière détaillée les tronçons de la rivière où des groupes de valeurs supérieures ou inférieures à la moyenne de la série (ensemble des mesures de la profondeur ou de la largeur) apparaissent.

(iv) Les moyennes mobiles glissantes. Elles ont été utilisées pour déterminer la succession des périodes hydrologiques sèches (valeurs inférieures à la moyenne de la série) et humides (valeurs supérieures à la moyenne des séries). Cette analyse a été effectuée à l'échelle décennale. Le choix de cette échelle se justifie par le fait que nous voulions vérifier si les décennies sèches et humides observées aux États-Unis (e.g. Barlow et al., 2001; Cook et al., 2007; Goodrich, 2007; Mauget, 2003a, 2003b; Schubert et al., 2004) ont affecté aussi le Québec méridional. Cet aspect est fort important en géomorphologie fluviale, notamment pour interpréter les changements morphologiques qui affectent les chenaux des rivières.

2.3.3. Analyse des corrélations

2.3.3.1. Corrélations simples

Pour vérifier l'existence de l'interconnexion entre la saison printanière et automnale, nous avons corrélié les débits de crues de saisons. L'objectif est de vérifier si on peut prédire les débits automnaux à partir des crues printanières. En d'autres termes, on veut vérifier si les années caractérisées par de fortes crues printanières le sont aussi par de fortes crues automnales. Un tel lien peut être interprété comme le résultat ou la covariation induit par un même facteur climatique. Pour éliminer « l'effet de taille » associé aux valeurs extrêmes sur les valeurs des coefficients de corrélation, nous avons centré et réduit (standardisation) les séries analysées.

2.3.3.2. Corrélations canoniques

Pour déterminer l'influence des indices climatiques sur la variabilité temporelle des caractéristiques de crues, nous avons appliqué la méthode de corrélations canoniques (ACC) à l'échelle décennale. Le choix de cette échelle se justifie par le fait que l'influence de certains indices climatiques (AMO et PDO) ne se

manifeste qu'aux échelles multidécennales. Par rapport aux autres méthodes d'analyse multivariées, l'analyse des corrélations canoniques tient compte aussi bien des corrélations intra-groupes que des corrélations croisées entre variables de deux groupes. En effet, elle crée des facteurs (transformations linéaires des variables, communément appelées variables canoniques) dans le premier groupe (variables dépendantes) simultanément à des facteurs dans le second groupe (variables indépendantes). Elle impose à ces facteurs d'être orthogonaux entre eux au sein d'un même groupe, de sorte qu'ils s'interprètent comme de dimensions indépendantes du phénomène exprimé par un groupe de variables. Ainsi, l'analyse canonique permet de maximiser la corrélation entre le premier facteur du premier groupe et le premier facteur du second groupe; ensuite entre les seconds facteurs des deux groupes, chacun étant orthogonal aux deux facteurs de la première paire; ensuite entre les troisièmes facteurs et ainsi de suite. Chaque paire de facteurs exprime un type de relation entre variables des deux groupes. L'intensité de la relation d'un type déterminé est mesurée par un coefficient de corrélation dit canonique qui est le coefficient de corrélation entre les facteurs d'une même paire (Afifi et Clark, 1996). Cette méthode a été appliquée sur les données d'analyse en composantes principales et sur les indices climatiques.

CHAPITRE 3

ANALYSES ET RÉSULTATS

3.1 Mode de variabilité temporelle des crues printanières et automnales

Les résultats d'analyse en composantes principales des crues printanières et automnales sont présentés aux tableaux 3.1 et 3.2. Le nombre des modes et leur distribution spatiale sont différents au printemps et en automne. L'application du critère de Kayser a permis d'identifier quatre modes de variabilité temporelle de crues au printemps mais seulement trois en automne. La variance totale expliquée par les composantes principales significatives est respectivement de 74,9% au printemps et 71,5% en automne. Dans les deux cas, la variance expliquée par la première composante principale est quasi égale pour les deux saisons et représente près du tiers de la variance totale expliquée par les composantes significatives. Quant à la composition des composantes principales (modes de variabilité), il n'existe aucune différence en ce qui concerne les rivières de la rive nord (fig.3.1). En effet, ces rivières sont associées à la seconde composante principale aussi bien au printemps qu'en automne (fig.3.2). En revanche, en rive sud, on observe une différence entre le printemps et l'automne. Au printemps, les rivières sont corrélées à trois composantes différentes. La première composante est corrélée aux rivières situées principalement au centre de la rive sud, la troisième composante à celles situées au sud et la dernière composante, aux deux rivières situées au nord. En automne, la première composante est aussi corrélée aux rivières situées principalement au centre mais sa composition devient légèrement différente avec la présence de la rivière Chateaugay et l'absence des rivières Du Loup et Trois-Pistoles. La dernière composante regroupe toutes les rivières situées au nord du 47^{ème} parallèle. Enfin, le fait que la composition des modes de variabilité temporelle de crues change peu avec les saisons, il devient dès

lors facile de comparer la variabilité temporelle des crues selon les saisons et l'influence de celles-ci sur la relation entre les indices climatiques et les débits de crues.

TABLEAU 3.1

Saturations des rivières sur les composantes principales significatives
après rotation d'axes par la méthode varimax pour les crues printanières

Code	Rivières	CP I	CP II	CP III	CP IV
1	Chateaugay	-0.021	0.002	0.825	0.081
2	Eaton	0.188	0.147	0.826	-0.067
3	Nicolet du sud-ouest	0.226	0.183	0.812	-0.028
4	Etchemin	0.780	0.215	0.141	0.065
5	Beaurivage	0.772	-0.056	0.247	-0.047
6	Du Sud	0.868	0.023	0.075	0.016
7	Du Loup	0.816	0.223	0.102	0.278
8	Trois-Pistoles	0.761	0.190	-0.081	0.424
9	Rimouski	0.354	0.093	0.123	0.803
10	Matane	-0.003	0.112	-0.089	0.879
11	De la Petite Nation	0.038	0.828	0.183	0.055
12	Matawin	0.097	0.891	0.132	0.093
13	Vermillon	0.203	0.817	-0.06	0.107
	Valeur propre	3.468	2.359	2.200	1.716
	Variance totale expliquée (%)	26.7	18.1	16.9	13.2

TABLEAU 3.2

Saturations des rivières sur les composantes principales significatives après rotation d'axes par la méthode varimax pour les crues automnales

Code	Rivières	CP I	CP II	CP III
1	Chateaugay	0.602	0.089	0.325
2	Eaton	-0.243	0.148	-0.158
3	Nicolet du sud-ouest	0.661	0.454	0.268
4	Etchemin	0.899	0.036	0.146
5	Beaurivage	0.872	0.259	0.223
6	Du Sud	0.822	0.039	0.423
7	Du Loup	0.517	0.037	0.694
8	Trois-Pistoles	0.417	0.078	0.825
9	Rimouski	0.296	0.339	0.827
10	Matane	0.172	0.248	0.749
11	De la Petite Nation	0.000	0.775	0.242
12	Matawin	0.128	0.900	0.112
13	Vermillon	0.114	0.877	0.090
	Valeur propre	3.688	2.938	2.670
	Variance totale expliquée (%)	28.4	22.6	20.5

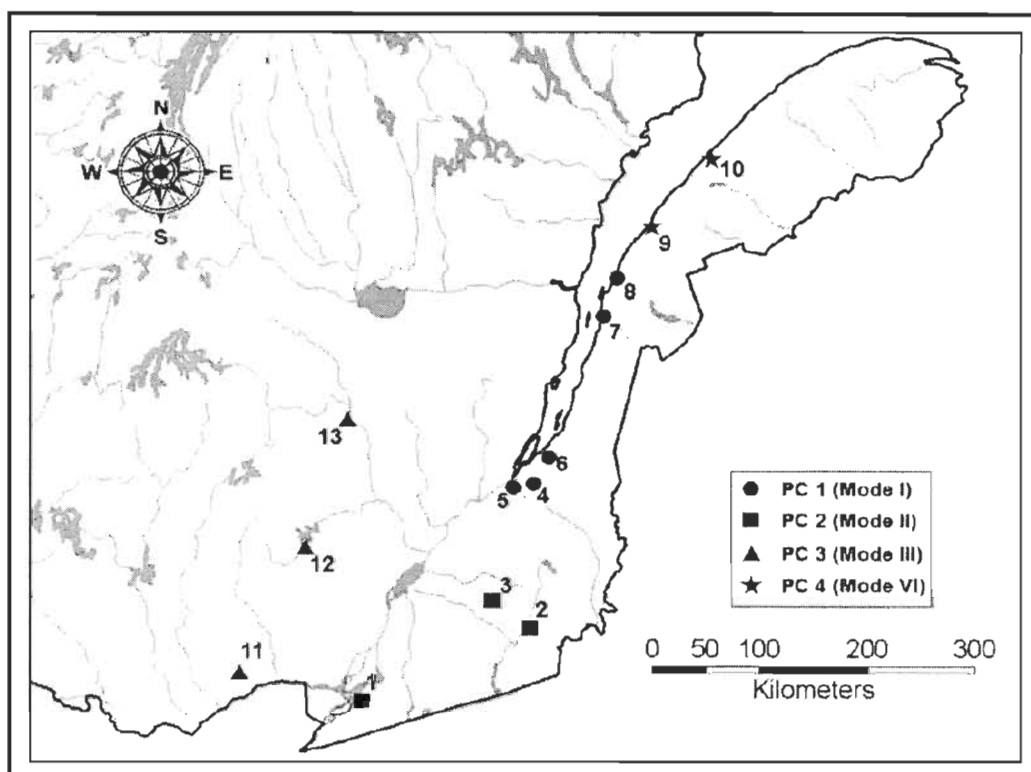


FIGURE 3.1 : Localisation des modes de variabilité temporelle des crues printanières

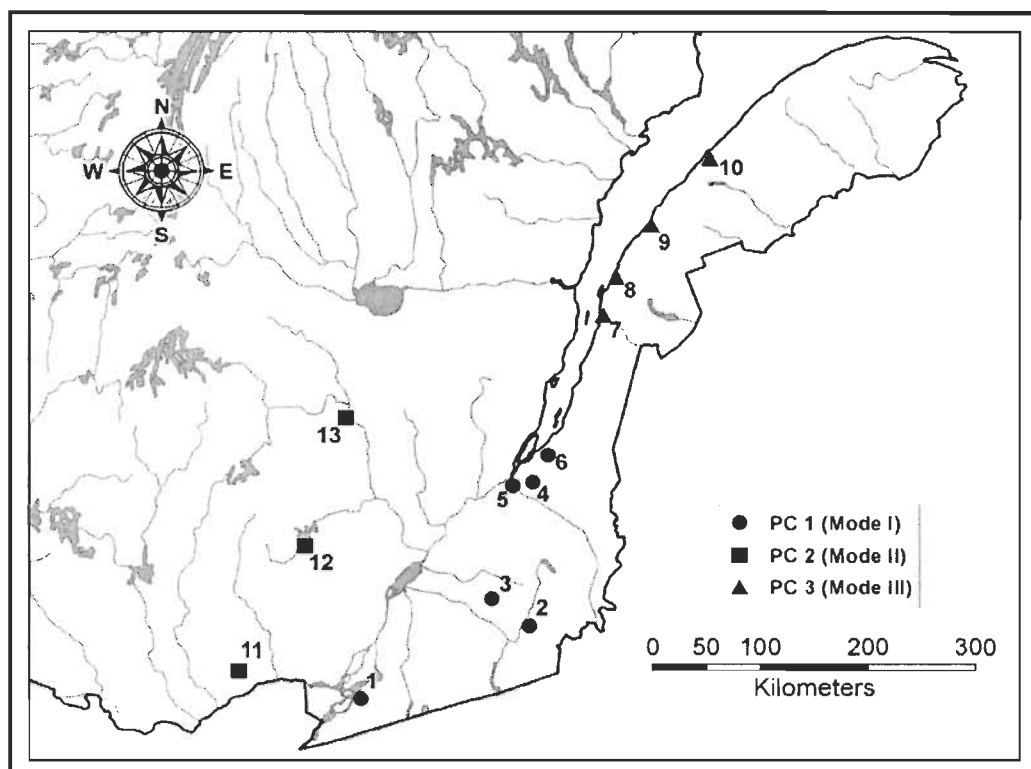


FIGURE 3.2 : Localisation des modes de variabilité temporelle des crues automnales

3.2 Comparaison de la variabilité interannuelle des débits de crues printanières et automnales

Précisons d'emblée que nous avons analysé la variabilité des notes factorielles des composantes principales. Les notes factorielles d'une composante principale représentent la variabilité temporelle des débits de toutes les rivières qui lui sont corrélées. C'est un des objectifs de l'analyse en composante principale de synthétiser l'information.

En ce qui concerne les valeurs de Q_{vp} (le quotient de variance permutative) consignées dans le tableau 3.3, on peut constater qu'au printemps, les valeurs de Q_{vp} de deux premières composantes principales sont statistiquement significatives. En automne, seule la valeur de Q_{vp} associée à la seconde composante est statistiquement significative. Il s'ensuit que les débits de crues des rivières de la rive nord sont affectés par une corrélation sérielle durant les deux saisons. En rive sud, les débits de rivières de la région centre le sont au printemps seulement.

TABLEAU 3.3
Comparaison des valeurs de Qvp des composantes principales
au printemps et en automne

Composantes principales	Crues printanières	Crues automnales
CP I	0,7163	0,9640
CP II	0,6603	0,6099
CP III	0,8404	0,8962
CP IV	0,8189	-

Les valeurs de Qvp significatives au seuil de 5% (pour n= 66)
apparaissent en gras.

Les paramètres de droite de régression linéaire sont consignés dans le tableau 3.4. Il ressort de ce tableau qu'au printemps, la régression est statistiquement significative seulement pour la CP II qui regroupe les rivières de la rive nord (fig. 3.3 et 3.4). On peut donc en conclure que ce sont ces rivières qui sont caractérisées par une hausse significative des crues au printemps. En automne, on observe aussi cette tendance à la hausse de crues. Mais, elle n'est pas statistiquement significative comme au printemps.

TABLEAU 3.4

Paramètres des équations de régression linéaire ajustées sur les notes
factorielles des composantes principales au printemps et en automne

	Crues printanières				Crues automnales			
	A	B	R ²	F	A	B	R ²	F
CP I	-0,011	21,19	0,049	3,349	-0,005	10,69	0,011	0,723
CP II	0,018	-35,66	0,134	10,058	0,009	-17,81	0,032	2,149
CP III	0,006	11,79	0,015	0,990	0,006	-10,78	0,013	0,856
CPIV	-0,0003	0,690	0,000	0,000	-	-	-	-

Les valeurs statistiquement significatives de F au seuil de 5%
apparaissent en gras.

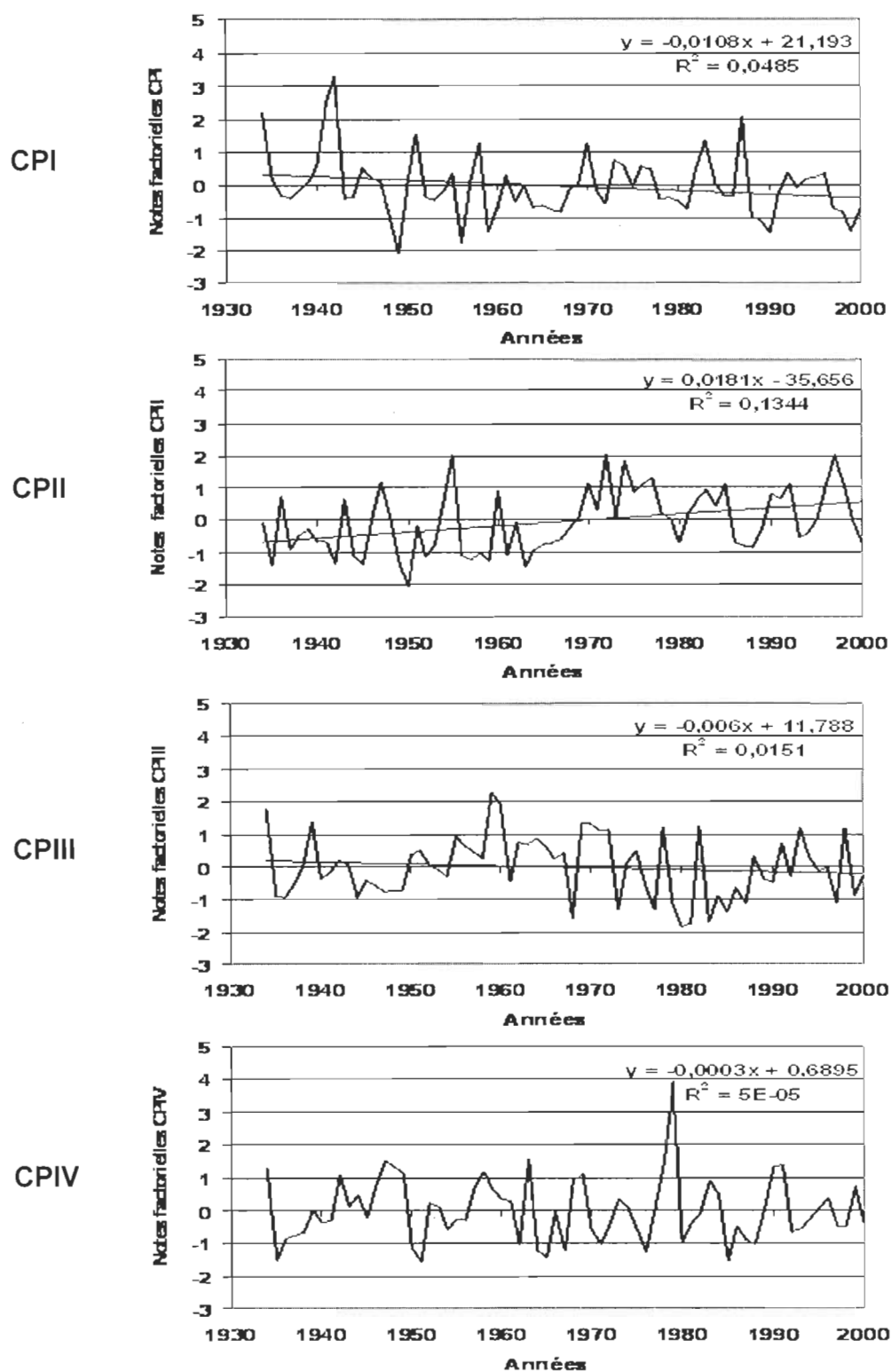


FIGURE 3.3 : Variabilité interannuelle des notes factorielles des composantes principales. Crues printanières

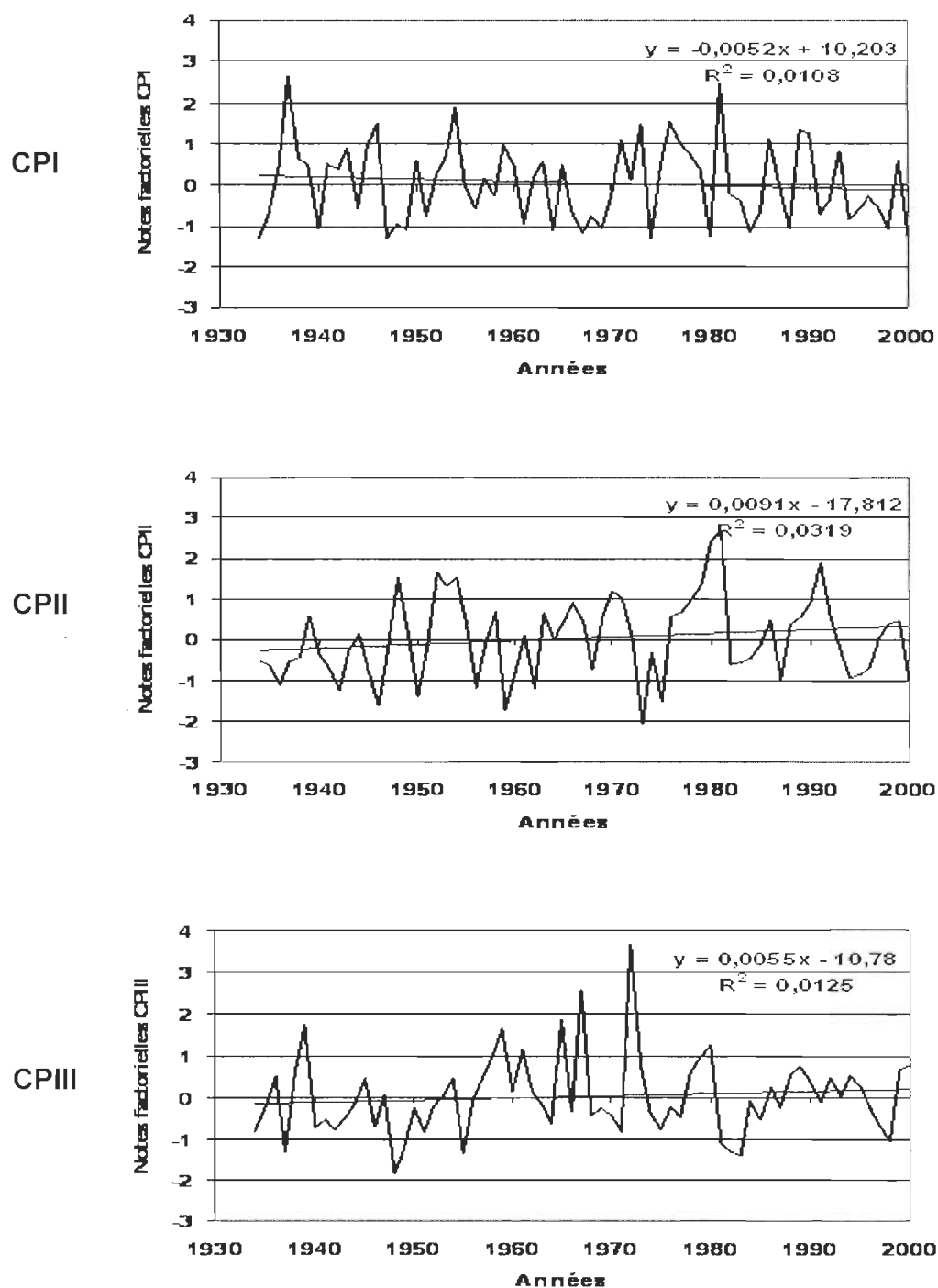


FIGURE 3.4 : Variabilité interannuelle des notes factorielles des composantes principales. Crues automnales

L'application du test non paramétrique de Mann-Kendall confirme en partie les résultats de la régression linéaire (fig.3.5 et 3.6). En effet, les courbes progressives des notes factorielles de la CP II révèlent que cette tendance à la hausse des crues observée au printemps est statistiquement significative. Quant aux autres composantes, leurs courbes s'enchevêtrent et/ou ne dépassent pas le seuil de signification de $+1,96$ ou $-1,96$. Rappelons que nous avons appliqué la correction proposée par Yu et Wang (2002) avant d'appliquer le test de Mann-Kendall pour les composantes principales affectées par une corrélation sérielle.

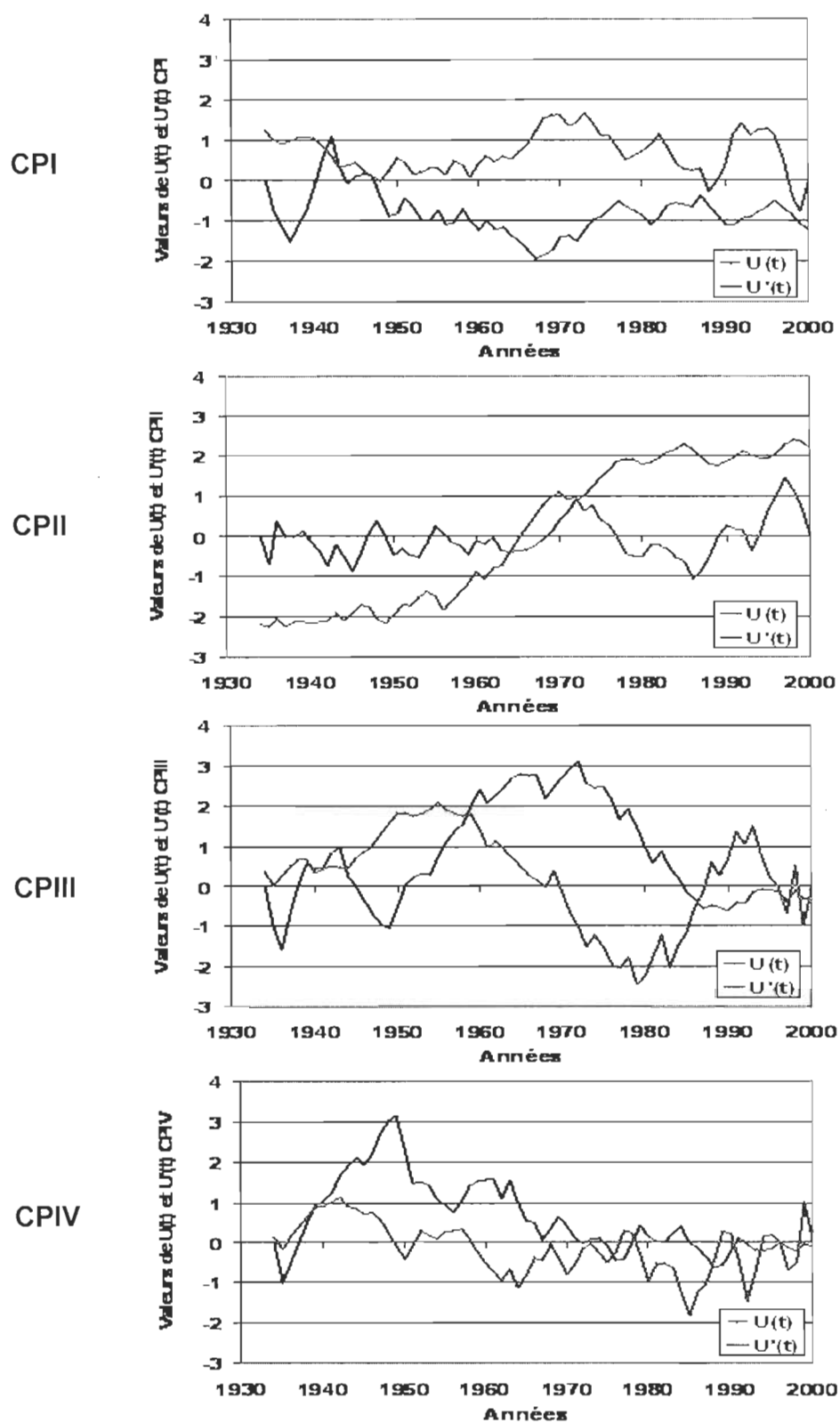


FIGURE 3.5 : Variabilité interannuelle des notes factorielles des composantes principales extraites des crues printanières. Application du test de Mann-Kendall.

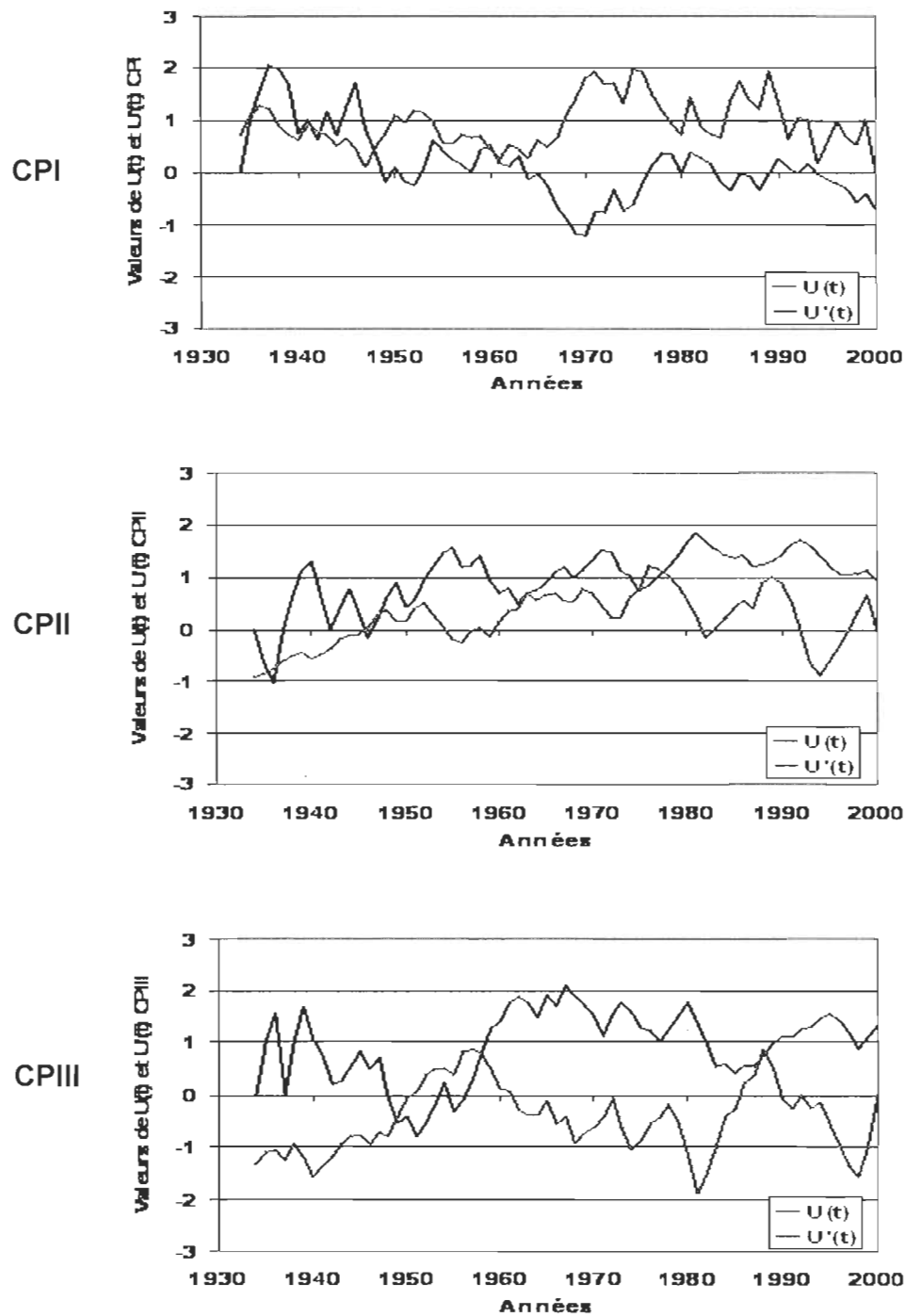


FIGURE 3.6 : Variabilité interannuelle des notes factorielles des composantes principales extraites des crues automnales. Application du test de Mann-Kendall.

3.3 Comparaison de la variabilité interdécennale des débits de crues printanières et automnales

L'analyse de la succession des périodes sèches et humides, basée sur la méthode des moyennes mobiles glissantes, révèle les faits significatifs suivants (fig.3.7 et 3.8):

(i) Le mode, qui regroupe principalement les rivières situées au centre de la rive sud et corrélé à la CP I, est caractérisé au printemps par une courte période très humide durant la décennie 40 suivie par une longue période sèche durant les deux décennies suivantes. Celle-ci a été suivie ensuite par une seconde période faiblement humide durant la décennie 70 à laquelle a succédé une nouvelle période sèche depuis. En automne, la durée de la première période humide et celle de la première période sèche diminuent significativement. Le fait marquant est l'augmentation relativement importante des débits pendant la seconde période humide de la décennie 70.

(ii) Le mode qui regroupe les rivières de la rive nord, corrélées à la seconde composante, est caractérisé par deux périodes seulement, de durée quasi égale : une période sèche durant les décennies 40 à 60 et une période humide depuis la décennie 70. En automne, cette succession est aussi conservée. Toutefois, l'intensité et la durée de la sécheresse durant la première période sont atténuées. En effet, on observe pendant quelques années des valeurs positives. Pendant la période humide, on note aussi une légère baisse de l'intensité de l'humidité durant la décennie 70.

(iii) Le mode, constitué par certaines rivières situées au nord du 47ème parallèle nord en rive sud et corrélé respectivement aux composantes IV au printemps et III en automne, est caractérisé par une alternance quasi régulière des périodes sèches et humides relativement courtes au printemps (fig.3.9). La période humide de la décennie 70 fut importante. En revanche, en automne, on observe une longue période humide durant les décennies 50 à 70 précédée et suivie par

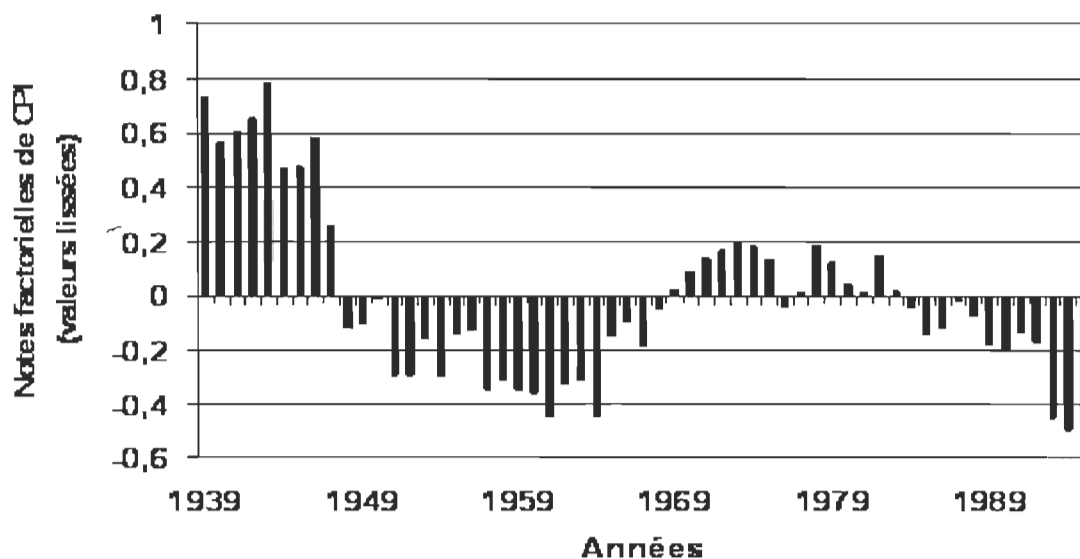
des périodes sèches (décennie 40 et décennie 80). Durant la décennie 90, une nouvelle période humide moins intense est survenue.

(iv) Enfin, le dernier mode printanier qui regroupe les rivières méridionales de la rive sud présente presque le type de succession des périodes que celle observée en automne au nord du 47ème parallèle (fig.3.10): une longue période humide (décennies 50 à 70) encadrée par deux périodes sèches. La durée et l'intensité de la sécheresse furent plus importantes durant les décennies 80 et 90.

Il ressort de cette analyse que les périodes sèches et humides surviennent de manière quasi synchrone en rive nord et au centre de la rive sud au printemps et en automne. En revanche, aucun synchronisme n'est observé à l'échelle du bassin versant de Saint-Laurent.

CPI : Rivières du centre de la rive sud

Crues printanières



Crues automnales

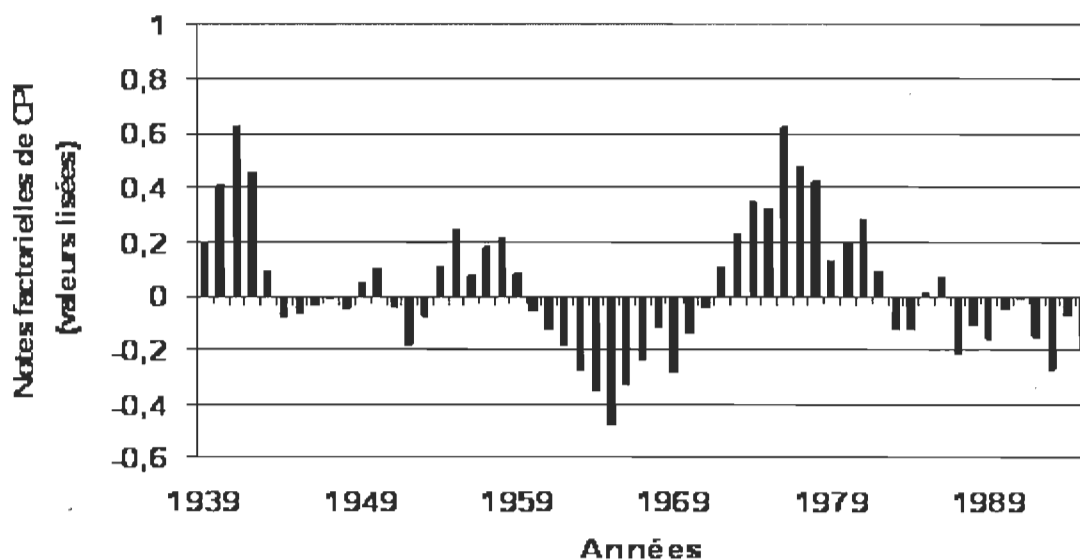


FIGURE 3.7. Comparaison de succession des périodes sèches et humides des crues printanières et automnales pour les rivières corrélées à CP I (Centre de la rive sud).

CPII : Rivières de la rive nord

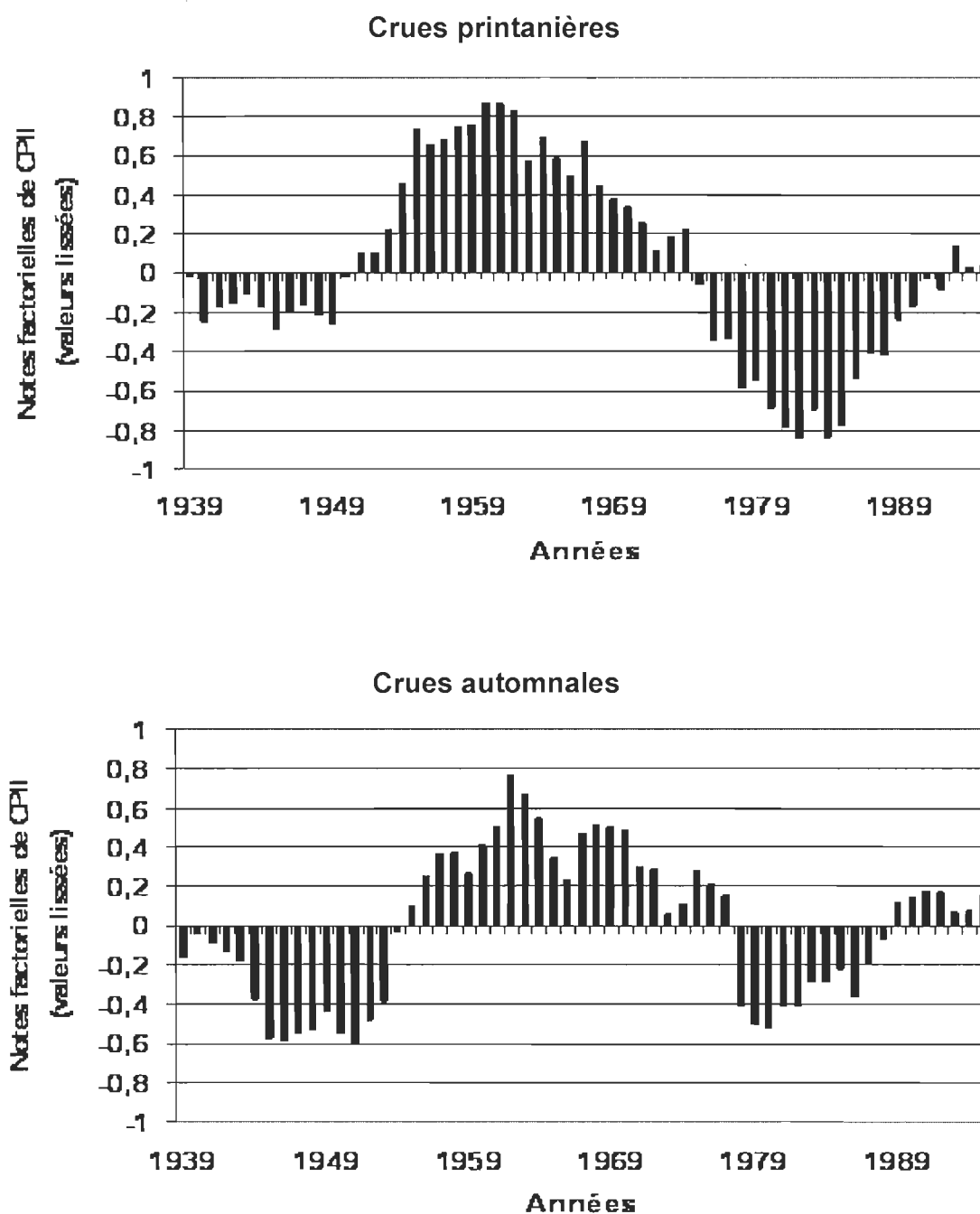


FIGURE 3.8. Comparaison de succession des périodes sèches et humides des crues printanières et automnales pour les rivières corrélées à CP II (rive nord).

CPIV-III : Rivières au Nord de la rive sud

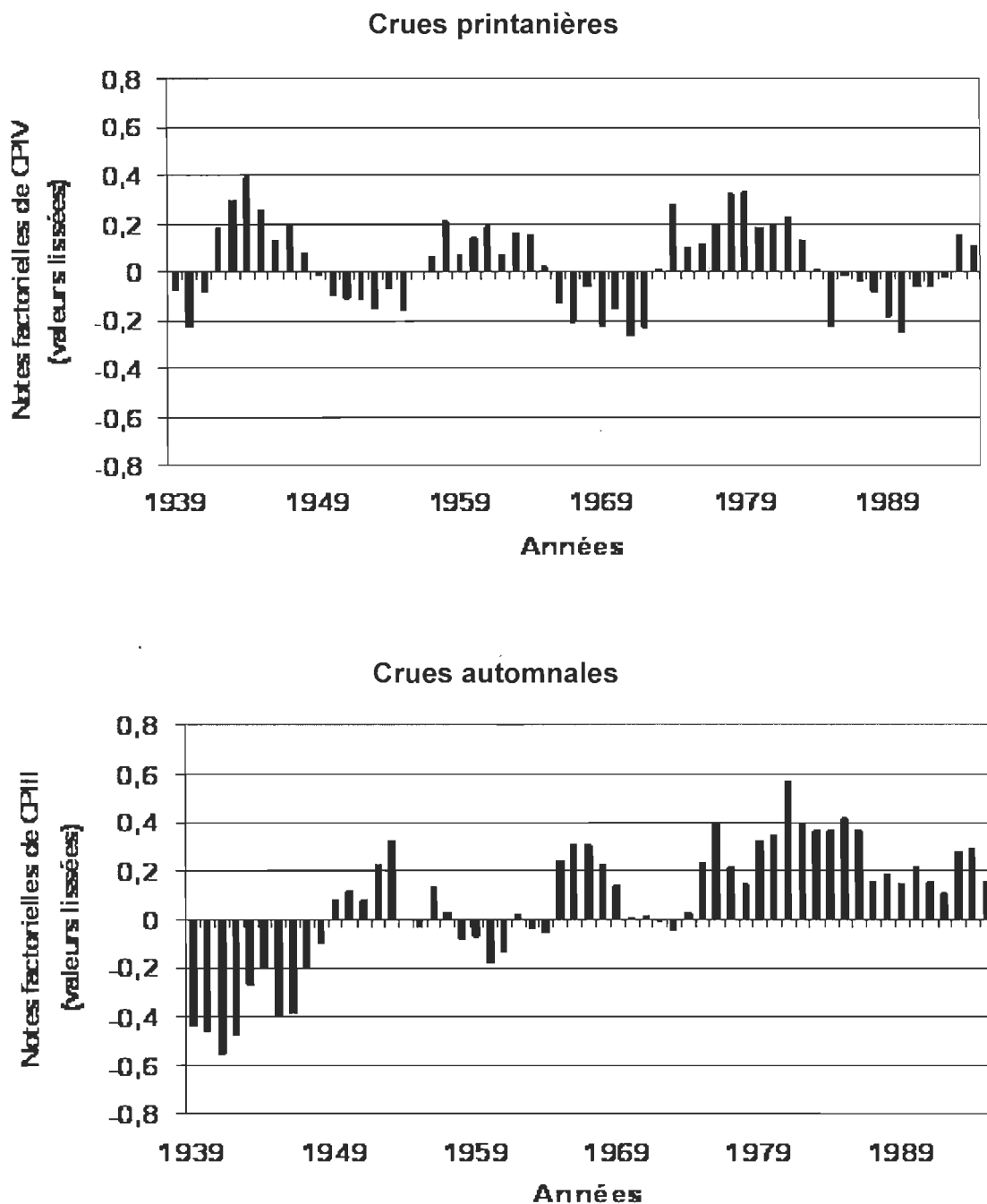


FIGURE 3.9. Comparaison de succession des périodes sèches et humides des crues printanières et automnales pour les rivières corrélées à CP III (Nord de la rive sud).

CP III : Rivières du Sud de la rive sud

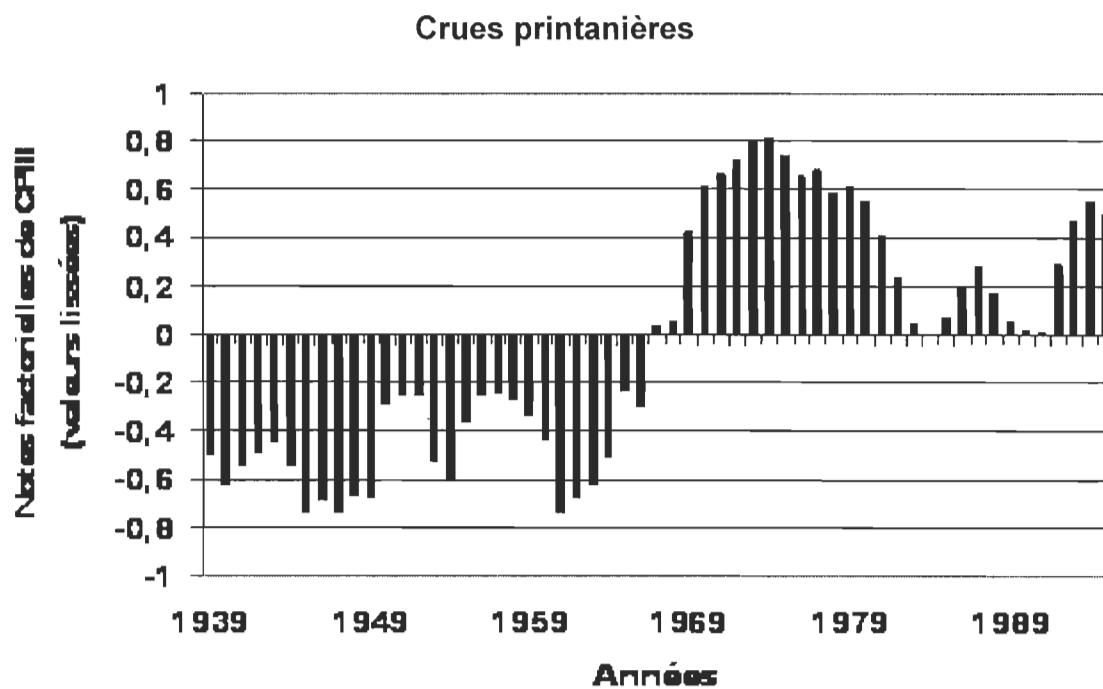


FIGURE 3.10 : Succession des périodes sèches et humides des crues printanières pour les rivières corrélées à CP III (Région sud de la rive sud).

3.4 Corrélation entre les crues saisonnières

Les coefficients de corrélation calculés entre les crues printanières et automnales pour les composantes principales corrélées aux mêmes régions géographiques sont présentés au tableau 3.5. Il ressort de ce tableau qu'aucun coefficient de corrélation n'est significatif à l'échelle annuelle. En revanche, ils sont tous significatifs à l'échelle décennale. Tous ces coefficients sont positifs. La plus forte valeur a été observée dans la région située au nord du 47ème parallèle. Il s'ensuit qu'il existe une certaine dépendance entre les crues printanières et automnales. Mais cette dépendance se manifeste surtout à l'échelle décennale. Ainsi, les décennies caractérisées par des fortes crues printanières le sont aussi pour les crues automnales.

TABLEAU 3.5

Coefficients de corrélation entre les crues printanières et automnales dans les mêmes régions géographiques

Composantes	Échelle annuelle (N = 67)	Échelle décennale (N = 57)
CP I	-0,044	0,466
CP II	0,125	0,566
CP IV-III	-0,042	0,720

Les valeurs statistiquement significatives apparaissent en gras. Les coefficients de corrélation varient entre 1 et -1, plus le coefficient se rapproche d'un maximum plus il y a dépendance entre les variables.

3.5 Analyse de la relation entre les crues saisonnières et les indices climatiques au moyen de l'analyse canonique des corrélations

Dans le tableau 3.6 sont consignées les valeurs des coefficients canoniques de corrélation au printemps et en automne. Il ressort de ce tableau les faits saillants suivants :

- (i) La valeur du premier coefficient canonique de corrélation est systématiquement plus élevée au printemps qu'en automne. En effet, au printemps, cette valeur dépasse 0,9000 alors qu'elle n'atteint pas ce seuil en automne. Ceci signifie que le lien entre les indices climatiques et les crues (composantes principales) est plus fort au printemps qu'en automne.
- (ii) Pour les crues printanières, le lien est plus fort avec les indices climatiques hivernaux et printaniers. Quant aux crues automnales, ce lien l'est avec les indices climatiques hivernaux et automnaux.
- (iii) Le nombre des coefficients canoniques de corrélation statistiquement significatifs est sensiblement égal durant les deux saisons. Toutefois, pour les crues printanières, deux coefficients canoniques de corrélation sont significatifs lorsqu'on utilise les indices climatiques automnaux.
- (iv) Enfin, si on considère que les échantillons analysés ne sont pas probabilistes, le quatrième coefficient canonique de corrélation extrait des données de crues printanières n'est pas statistiquement significatif au seuil de 5%, peu importe les indices climatiques saisonniers utilisés.

TABLEAU 3.6
Valeurs des coefficients canoniques de corrélation

	CRUES PRINTANIÈRES			CRUES AUTOMNALES		
	R ²	F	p<F	R ²	F	p<F
INDICES CLIMATIQUES HIVERNAUX						
CP I	0.974	27.51	<0.0001	0.895	19.10	<0.0001
CP II	0.883	12.00	<0.0001	0.843	14.24	<0.0001
CP III	0.562	4.33	0.0006	0.495	5.52	0.0023
CP IV	0.282	2.21	0.120	-	-	-
INDICES CLIMATIQUES PRINTANIER						
CP I	0.975	23.43	<0.0001	0.833	11.68	<0.0001
CP II	0.797	8.43	<0.0001	0.811	9.20	<0.0001
CP III	0.604	4.91	0.0002	0.1792	0.56	0.6411
CP IV	0.246	1.64	0.205	-	-	-
INDICES CLIMATIQUES ESTIVAUX						
CP I	0.951	15.33	<0.0001	0.834	9.28	<0.0001
CP II	0.754	6.16	<0.0001	0.641	5.81	< 0.0001
CP III	0.525	3.19	0.0066	0.456	4.46	0.0074
CP IV	0.165	0.72	0.493	-	-	-
INDICES CLIMATIQUES AUTOMNAUX						
CP I	0.925	11.53	< 0.0001	0.872	11.64	<0.0001
CP II	0.745	5.12	< 0.0001	0.660	6.66	<0.0001
CP III	0.379	1.89	0.0896	0.496	5.54	0.0023
CP IV	0.242	1.59	0.2148	-	-	-

En ce qui concerne les coefficients de structure, le tableau 3.7 donne un exemple simple de leur interprétation pour les crues printanières. Dans ce dernier tableau, la première variable canonique V1 est fortement corrélée à la CP II (rivières de la rive nord), la seconde V2 à CP III (rivières de la rive sud situées au sud), la troisième V3 à CP I (rivières de la rive sud situées au centre) et la dernière à CP IV (rivières de la rive sud situées au nord). Quant aux indices climatiques, la première variable canonique W1 est corrélée aux indices OAM, OA et, dans une moindre mesure, à OAU. Quant à W2, elle est corrélée à OAU. W3 est corrélée aux indices ONA et OPD et, enfin, W4 n'est corrélée à aucun indice climatique.

TABLEAU 3.7

**Coefficients de structure calculés entre les crues printanières
(composantes principales) et les indices climatiques automnaux**

	V1	V2	V3	V4	W1	W2	W3	W4
CP I	0,034	-0,572	0,815	-0,092				
CP II	-0,943	0,080	0,317	-0,063				
CP III	0,463	0,846	0,221	0,144				
CP IV	0,123	-0,117	0,083	-0,982				
OAMa					0,955	-0,034	-0,141	0,259
OAa					-0,834	0,037	0,125	0,534
ONaAa					0,269	-0,298	0,648	0,524
OPDa					-0,492	0,052	0,639	-0,086
OAUa					-0,676	0,611	0,170	0,216
Variance expliquée (%)	28	26,6	20,5	24,9	47,6	9,3	17,9	13,6

Les résultats relatifs à l'analyse de tous les coefficients de structure sont résumés au tableau 3.8. Il ressort de celui-ci les faits significatifs suivants :

(i) Les crues printanières et automnales sont corrélées à plusieurs indices climatiques en fonction des saisons. Aucun indice climatique n'influence seul la variabilité temporelle des crues durant les deux saisons à l'échelle du bassin versant de Saint-Laurent.

(ii) Dans la région centre de la rive sud, associée à la première composante principale, les crues printanières sont corrélées aux indices OAU, OA, ONA et OPD alors que les crues automnales le sont seulement à l'indice OPD. Ce dernier est le seul indice corrélé aux crues de deux saisons dans cette région. Il est corrélé positivement aux crues. Ainsi, la phase positive de cet indice est associée à une hausse de la magnitude de crues et vice versa.

(iii) En rive nord dont les rivières sont corrélées à CP II aussi bien au printemps qu'en automne, les crues sont corrélées à tous les indices climatiques durant les deux saisons, à l'exception de l'indice ONA en automne.

(iv) Dans la région nord de la rive sud, les crues sont corrélées seulement à OA au printemps mais aussi à OAM et ONA en automne.

(v) Enfin, dans la partie méridionale de la rive sud, les crues sont corrélées à tous les indices, à l'exception de OPD. Ce dernier le devient en automne.

TABLEAU 3.8**Synthèse sur la relation entre les crues et les indices climatiques.****Résultats de l'analyse canonique des corrélations**

Indices climatiques saisonniers	Crues printanières				Crues automnales		
	CP I	CP II	CP III	CP IV*	CP I	CP II	CP III
Hiver	OAU	OAM ONA	OAM ONA	OA	-	OAM	-
Printemps	OA	OAM ONA	OAM ONA	-	OPD	OAM	ONA
Été	OAU	OAM ODP	OAM ONA OA	-	-	-	OAM OA ONA
Automne	ONA, OPD	OAM OA OAU	OAU	-	OPD	OAM OA OAU	-

*Le coefficient canonique associé à cette composante n'est pas statistiquement significatif.

3.6 Choix des indices climatiques pertinents pour prédire la variabilité temporelle des crues printanières et automnales

L'objectif ultime de cette étude est de pouvoir choisir les indices climatiques pertinents pour prédire la variabilité des crues printanières et automnales des affluents et sous-affluents de Saint-Laurent. Il est important de souligner le fait que l'analyse canonique des corrélations a pour objectif de maximiser les coefficients de corrélations entre les variables de deux groupes. Par conséquent, contrairement à l'analyse des coefficients de corrélation simple ou partielle, l'analyse canonique ne mesure pas directement le degré de liaison entre une variable indépendante et une variable dépendante. Ce lien est mesuré de manière indirecte par l'intermédiaire des nouvelles variables canoniques (V_i et W_i). Ainsi, dans une perspective prévisionnelle, les résultats de cette analyse doivent être utilisés avec beaucoup de circonspection. Il est prudent de vérifier le lien entre les débits et les indices climatiques suggérés par l'analyse canonique au moyen de la méthode de corrélation simple. Nous avons ainsi corrélé directement les débits de crues de chaque rivière aux différents indices climatiques afin de procéder au choix d'un indice climatique pertinent pour prédire la variabilité temporelle des crues au printemps et en automne. Dans le tableau 3.9 sont consignés les indices climatiques les mieux corrélés aux crues printanières et automnales pour chaque rivière. Il ressort de ce tableau les faits significatifs suivants :

- Les valeurs des coefficients de corrélation sont plus élevées au printemps qu'en automne. Notons que seules les crues de la rivière Trois-Pistoles ne sont significativement corrélées à aucun indice climatique.
- Les valeurs des coefficients de corrélation sont plus élevées en rive nord qu'en rive sud. Par conséquent, la prédiction de la variabilité temporelle des crues est meilleure pour les rivières de la rive nord (fig.3.11 à fig.3.14). De plus, c'est seulement en rive nord que toutes les rivières sont corrélées à un même indice, à savoir, OAM hivernal au printemps.

- Pour une même rivière, aucun indice climatique n'est corrélé aux crues de deux saisons, à l'exception de la rivière Du Loup dont les crues printanières et automnales sont corrélées à OA.

TABLEAU 3.9
Coefficients de corrélation calculés entre les indices climatiques et les débits de crues de rivières au printemps

No	Rivières	Crues printanières	Crues automnales
1	Chateaugay	OPDh (-0,648)	OAMh (-0,806)
2	Eaton	OAe (-0,694)	OAUp (-0,691)
3	Nicolet du sud-ouest	OAMp (-0,600)	OPDa (0,541)
4	Etchemin	OAe (0,541)	OAUh (0,509)
5	Beaurivage	OAUp (-0,601)	OPD (0,597)
6	Du Sud	OAe (0,718)	OPDh (0,584)
7	Du Loup	OAe (0,520)	OAu (-0,518)
8	Trois-Pistoles	-	-
9	Rimouski	-	OAUp (0,556)
10	Matane	ONAh (0,663)	OAMp (-0,703)
11	De la Petite Nation	OAMh (-0,896)	ONAh (-0,697)
12	Matawin	OAMh (-0,886)	OAe (-0,815)
13	Vermillon	OAMh (-0,815)	ONAp (0,804)

h = indice climatique hivernal; e = indice climatique estival; p = indice climatique printanier; a = indice climatique automnal.

Rivière Chateauguay

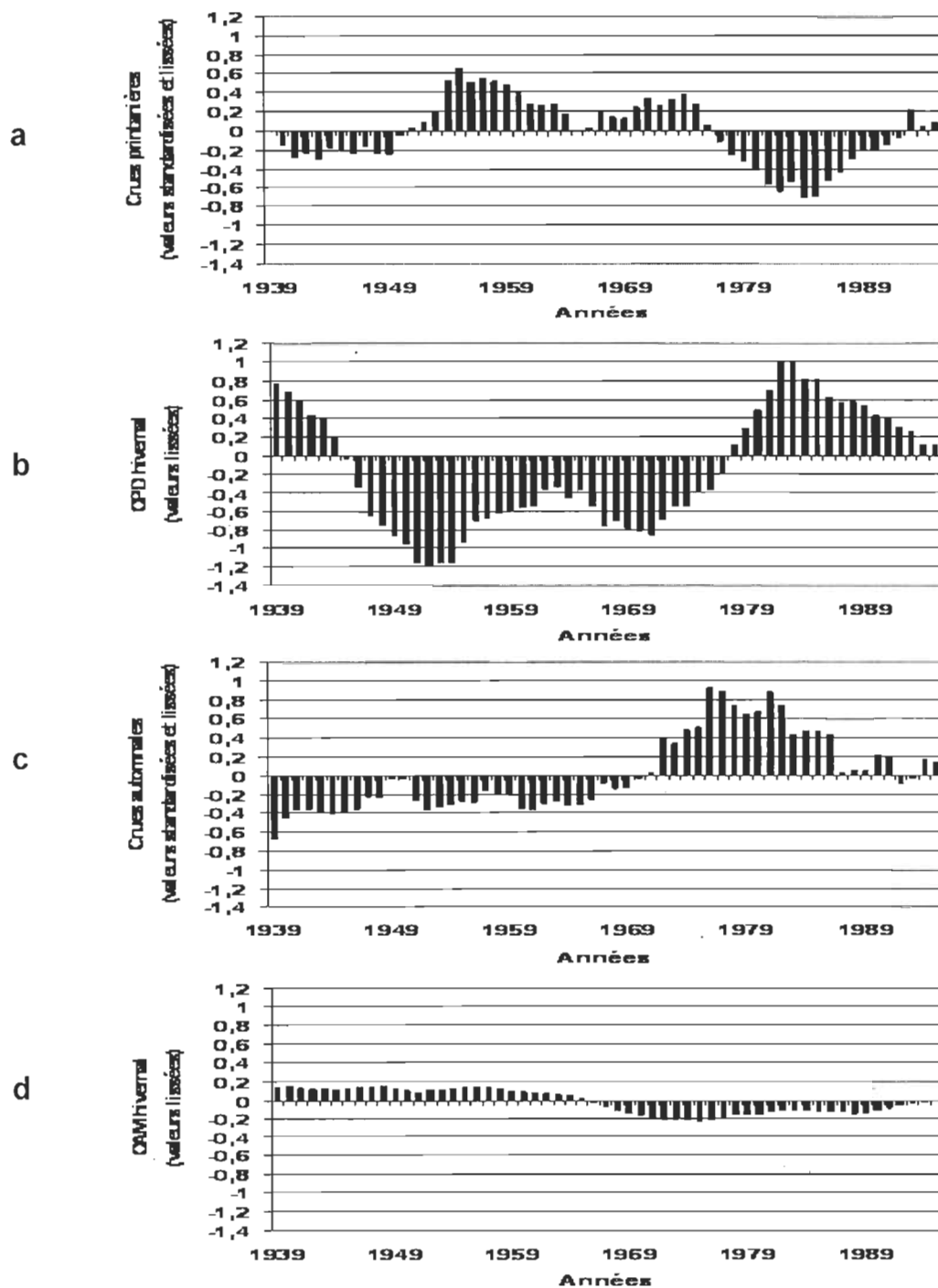


FIGURE 3.11 : Comparaison de la variabilité interdécennale des crues et des indices climatiques les mieux corrélés aux crues. Cas de la rivière Chateauguay. a = crues printanières; b = indice OPD hivernal, c = crues automnales; d = indice OAM hivernal

Rivière Du Sud

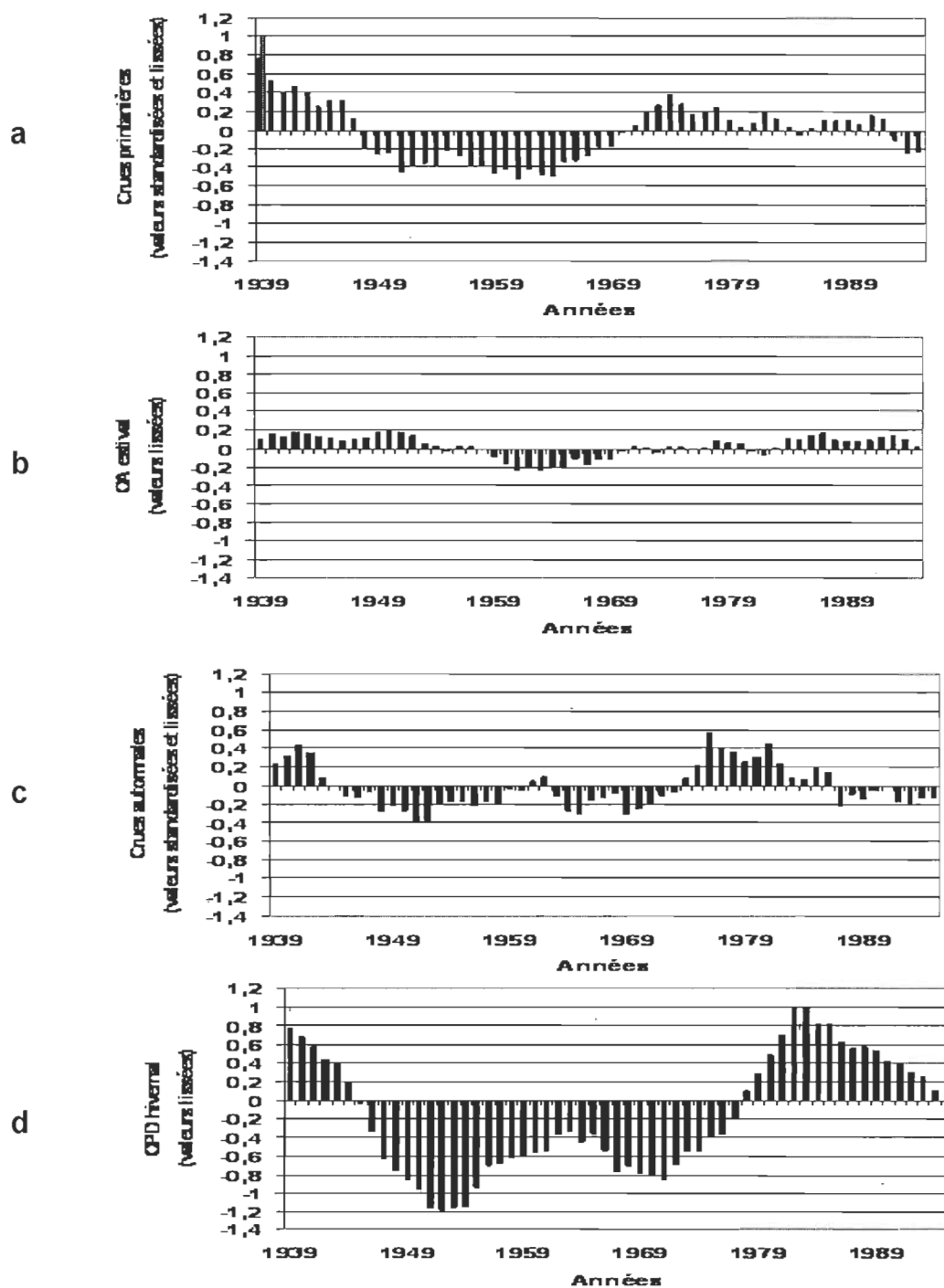


FIGURE 3.12 : Comparaison de la variabilité interdécennale des crues et des indices climatiques les mieux corrélés aux crues. Cas de la rivière Du Sud. a = crues printanières; b = indice OA estival, c = crues automnales; d = indice OPD hivernal

Rivière Matane

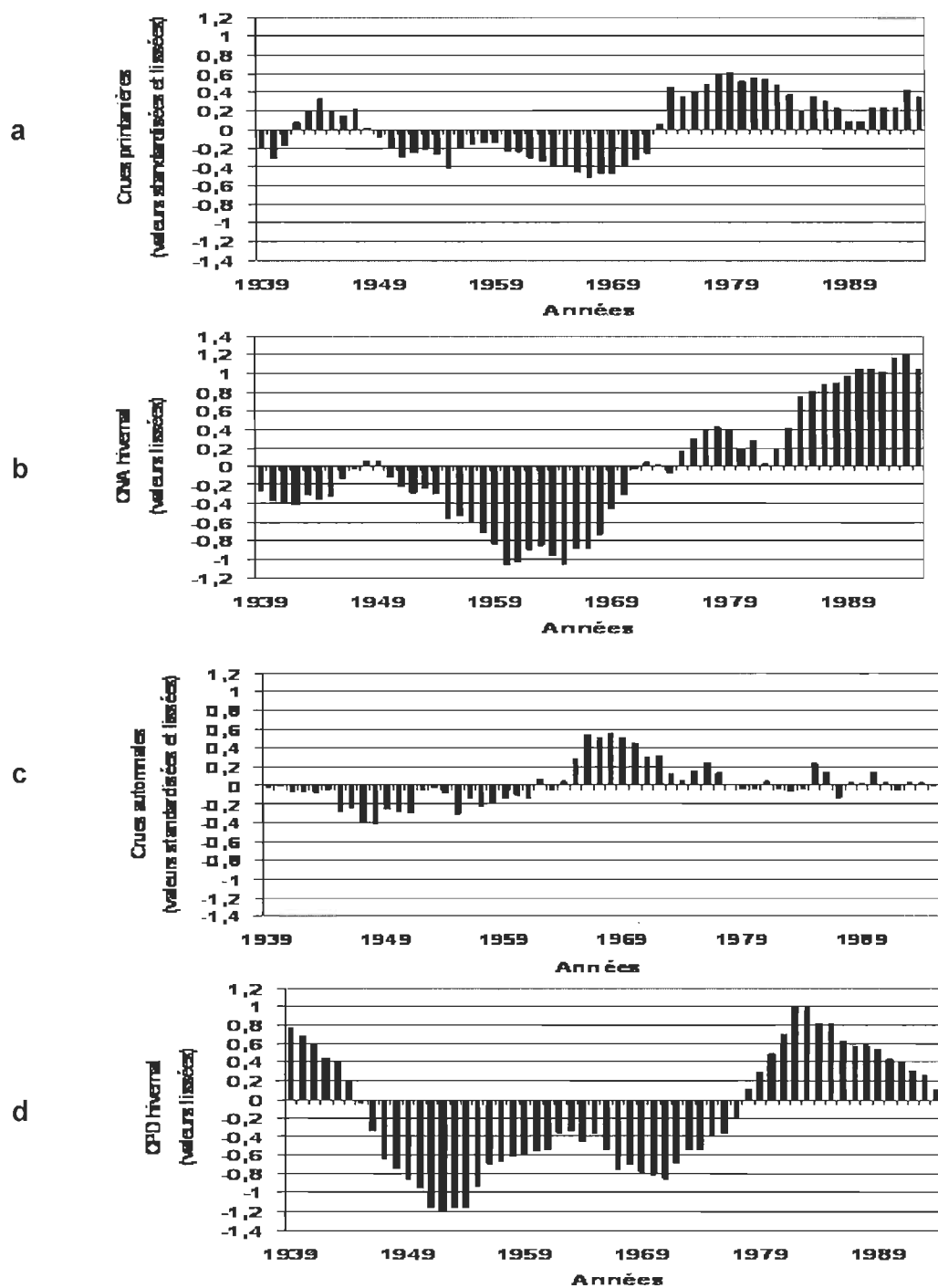


FIGURE 3.13 : Comparaison de la variabilité interdécennale des crues et des indices climatiques les mieux corrélés aux crues. Cas de la rivière Matane. a = crues printanières; b = indice ONA hivernal, c = crues automnales; d = indice OPD hivernal

Rivière Vermillon

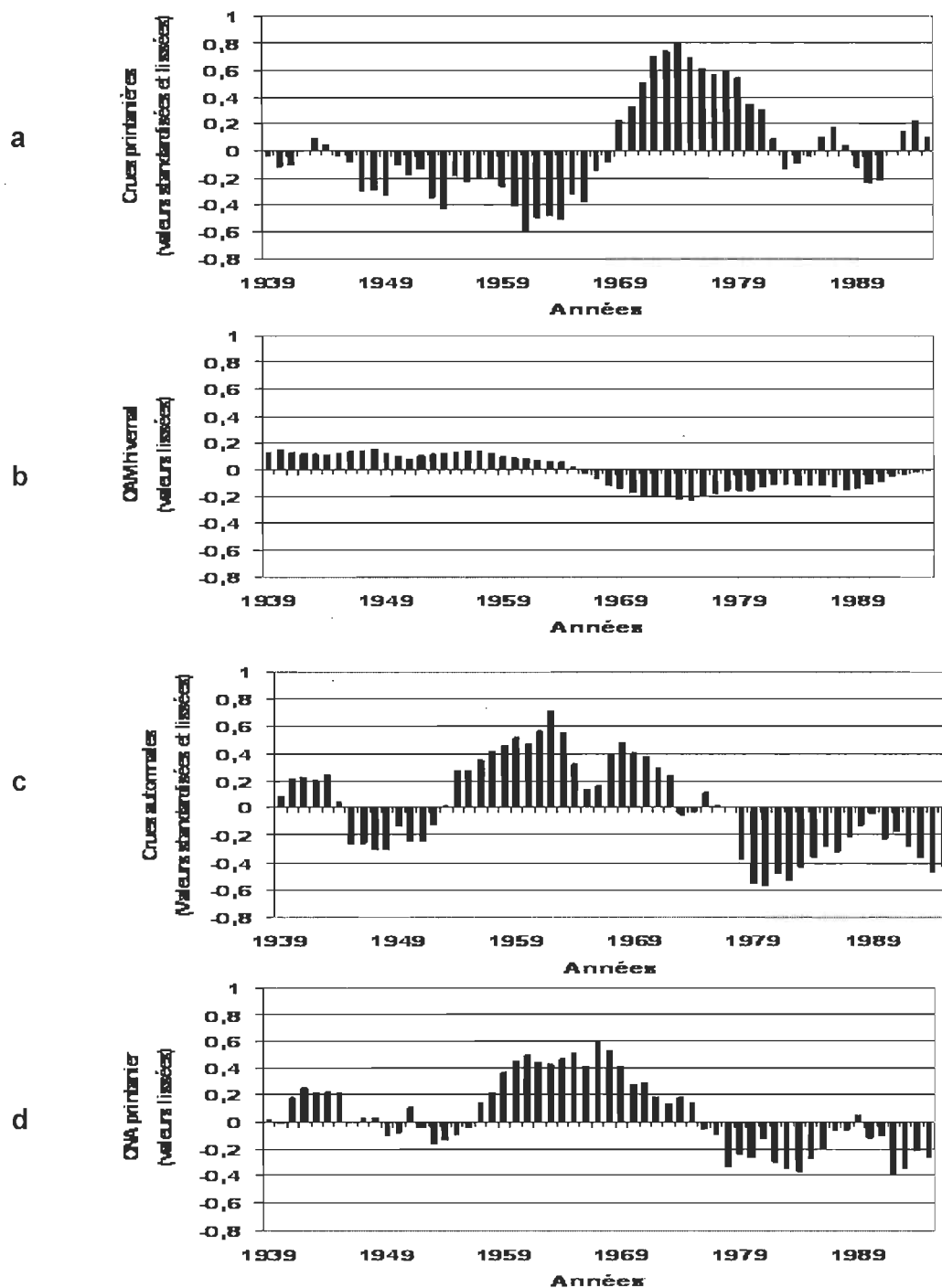


FIGURE 3.14 : Comparaison de la variabilité interdécennale des crues et des indices climatiques les mieux corrélés aux crues. Cas de la rivière Vermillon. a = crues printanières; b = indice OAM hivernal, c = crues automnales; d = indice ONA printanier

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Ce chapitre sera articulé autour des quatre points suivants :

1. La comparaison des modes de variabilité temporelle des précipitations et des débits au Québec méridional.
2. La variabilité temporelle des crues printanières et automnales.
3. L'analyse des facteurs de genèse des fortes crues printanières et automnales.
4. La relation entre les indices climatiques et la variabilité temporelle des fortes crues au printemps et en automne au Québec méridional.

4.1 Comparaison des modes de variabilité temporelle des précipitations et des débits au Québec méridional

Dans leur étude consacrée aux modes de variabilité temporelle des précipitations annuelles dans la partie nord-orientale du continent nord-américain (région comprise entre 30° et 60°N à l'est du méridien de 100°O), Jutla et al. (2006) ont identifié deux modes de variabilité situés de part et d'autre du 46°N). Quant à Assani et al. (2008c), l'analyse des précipitations automnales (d'août à novembre) pendant la période 1950-2000 leur a permis d'identifier trois modes de variabilité temporelle au Québec méridional : deux modes en rive sud situés de part et d'autre du 47ème parallèle nord et un seul mode en rive nord. En ce qui concerne les débits moyens annuels, Anctil et Coulibaly (2004) ont identifié deux modes de variabilité au Québec méridional pendant la période 1938-2000 : un mode en rive sud et un autre en rive nord. En analysant presque

les mêmes rivières durant la période (1934-2000), Assani et al. (2008d) ont identifié trois modes : deux en rive sud de part et d'autre du 47ème parallèle et un seul en rive nord. Toutefois, dans une étude antérieure fondée sur 70 rivières réparties à l'échelle de tout le Québec durant la période 1970-1995, Assani et al. (2006) ont identifié trois modes des débits moyens annuels dans le bassin versant de Saint-Laurent : le premier mode regroupe toutes les rivières de la rive sud situées au sud du 47ème parallèle et quelques rivières situées en rive nord dans la vallée de Saint-Laurent. Le second mode regroupe les rivières situées au nord du 47ème parallèle sur la rive sud et le dernier mode, les rivières situées au sud-ouest en rive nord. Ces trois modes sont comparables à ceux identifiés à l'échelle annuelle.

La confrontation de ces résultats met en évidence l'existence de trois principaux modes de variabilité des précipitations et des débits annuels et saisonniers. En rive sud, il existerait deux modes situées de part et d'autre du 47ème parallèle et un troisième mode en rive nord. Ces trois modes ont été observés pour les crues automnales avec la même distribution spatiale. En revanche, pour les crues printanières, on a observé quatre modes. Toutefois, le mode supplémentaire a été observé en rive sud. Ainsi, sur cette dernière rive, les modes sont disposés selon la latitude.

L'existence de ces modes de variabilité a été attribuée principalement à l'influence de la continentalité sur les variables hydroclimatiques (Anctil et Coulibaly, 2004). Mais, ces auteurs n'ont pas expliqué les mécanismes climatiques par lesquels ce facteur exercerait cette influence. Nous y reviendrons plus loin.

4.2 Variabilité temporelle des crues printanières et automnales

L'analyse de la variabilité temporelle de crues saisonnières a révélé que seules les crues printanières de rivières de la rive nord sont affectées par une tendance à la hausse de leurs débits de crues. En automne, aucun changement significatif des débits n'a été observé en rive nord malgré une tendance à la hausse. En rive sud, aucun changement significatif dans la variabilité temporelle des débits ne fut observé, aussi bien au printemps qu'en automne. Par conséquent, on n'observe ni une hausse ni une baisse généralisées des crues printanières et automnales à l'échelle du bassin versant de Saint-Laurent. Dans leur étude pancanadienne sur la variabilité interannuelle des débits au cours du 20ème siècle, Zhang et al. (2001) ont observé une diminution significative des débits maximums, notamment dans toute la partie méridionale du Canada (y compris le Québec). De plus, ces auteurs ont observé une baisse significative des débits mensuels en automne (septembre et octobre), mais une hausse au printemps (avril). A l'échelle journalière, les débits maximums ont significativement diminué. Ces observations ne corroborent pas tous nos résultats. En effet, la variabilité temporelle des crues au Québec est caractérisée globalement par l'absence de changements significatifs, à l'exception de la rive nord où les débits de crues ont significativement augmenté au printemps seulement.

Durant le 20ème siècle, la variabilité temporelle des débits et des précipitations fut caractérisée par une succession de décennies sèches et humides en Amérique du nord. Cette succession a été bien documentée, surtout aux États-Unis (e.g. Barlow et al., 2001; Cook et al., 2007; Goodrich, 2007; Mauget, 2003a, 2003b; Schubert et al., 2004). Dans une grande partie des États-Unis, cette succession a été principalement attribuée à l'indice OAM (Enfield et al., 2001; McCabe et al., 2004). Ainsi, les décennies 30, 50 et 60 furent particulièrement sèches alors que les décennies 70 et 80 furent plutôt humides. Au Québec, Assani et al. (2008d) ont démontré une opposition dans cette

succession des périodes entre la rive nord et la rive sud en ce qui concerne les débits moyens annuels. Selon ces auteurs, les décennies 40 à 60 ont été sèches en rive nord, mais humides en rive sud. En revanche, les décennies 80 et 90 ont été humides en rive nord, mais sèches en rive sud. Seule la décennie 70 fut humide sur les deux rives. En rive nord, les crues printanières et, dans une moindre mesure les crues automnales, sont caractérisées aussi par cette succession. En revanche, en rive sud, la succession observée à l'échelle annuelle n'est pas reproduite à l'échelle journalière. La succession des périodes sèches et humides varie d'une région à une autre.

4.3 L'analyse des facteurs de genèse des fortes crues printanières et automnales et leur relation avec les indices climatiques

Au Québec, la magnitude de crues au printemps et en automne dépend de quatre principaux facteurs dont l'importance dépend des saisons.

4.3.1. L'humidité atmosphérique

La quantité des précipitations qui tombent sous forme solide ou liquide dépend de la vapeur d'eau contenue dans les nuages. Plus, il y a de la vapeur d'eau (humidité) dans les nuages, plus la quantité des précipitations générées par ce nuage augmente. Ainsi, les fortes crues surviennent généralement lorsque la quantité de vapeur d'eau est très élevée dans l'atmosphère. Au Québec, la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère provient de différentes sources selon les saisons.

Rappelons que les crues printanières proviennent principalement de la fonte de neiges. Par conséquent, leur magnitude dépend de la quantité de neige qui tombe en hiver. Si cette quantité augmente, la magnitude des crues au printemps augmente aussi et vice versa. En hiver, le sol reste gelé en permanence. Par conséquent, la contribution de l'évaporation de l'eau contenue

dans le sol est nulle. Quant aux plans d'eau (lacs, rivières et marais) présents au Québec, leur contribution est fort limitée en raison des températures hivernales très faibles et la formation d'une couche de glace en surface qui interdit toute évaporation. Il s'ensuit que la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère provient de l'océan Atlantique ou des régions des États-Unis où le sol n'est pas gelé en hiver. Les deux sources sont donc allochtones. En revanche, en automne, la vapeur d'eau provient de différentes sources : l'évaporation de l'eau contenue dans le sol, l'évaporation à partir des plans d'eau, la transpiration de la végétation, l'océan Atlantique, la région continentale des États-Unis, les vents d'ouest et les cyclones tropicaux. Il s'agit en effet à la fois de sources allochtones et autochtones. Cependant, il est encore difficile de quantifier la contribution de ces différentes sources dans la quantité des pluies estivo-automnales au Québec.

4.3.2. La structure verticale de l'atmosphère

La quantité de vapeur d'eau ne suffit pas à expliquer la quantité d'eau qui tombe au sol. Pour que cette quantité de vapeur génère de fortes précipitations, il faut que les nuages qui contiennent cette vapeur d'eau se développent verticalement pour permettre le grossissement des gouttes de pluie ou des cristaux de neige dans les nuages. Rappelons qu'il existe deux mécanismes pour faire grossir les gouttes d'eau ou les cristaux de neige dans un nuage : le processus de Bergeron (pour les cristaux de neiges) et le processus de collision-coalescence (pour les gouttes de pluie). Ce développement vertical des nuages est associé à l'instabilité atmosphérique. Celle-ci est provoquée par plusieurs facteurs selon les saisons.

(i) En hiver, l'instabilité est provoquée par la rencontre de l'air chaud et de l'air froid (front froid). Cette rencontre crée des perturbations qui provoquent l'ascendance des masses d'air en altitude et favorise ainsi le développement vertical des nuages. Plus ces perturbations sont fréquentes et puissantes, plus

la quantité de neige qui tombe en hiver augmente et ultérieurement la magnitude des crues générées par la fonte de cette neige au printemps augmentera aussi. La puissance d'une perturbation dépend de la différence de température entre l'air chaud et l'air froid. Plus cette différence est grande, plus la perturbation sera puissante. Celle-ci peut ainsi générer de fortes précipitations lorsque la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère est suffisante.

(ii) En automne, l'instabilité atmosphérique peut être causée par plusieurs facteurs : le front froid, le réchauffement du sol et les cyclones tropicaux. En ce qui concerne le front froid, sa puissance diminue en automne en raison de la diminution du contraste thermique entre l'air chaud et l'air froid. Néanmoins, comme les températures automnales sont plus élevées en automne qu'en hiver, l'air peut contenir beaucoup de vapeur d'eau susceptible de générer de fortes pluies. Quant au réchauffement du sol, il génère des mouvements convectifs capables d'engendrer parfois de puissants orages qui peuvent déverser localement de grandes quantités de pluies. Enfin, les cyclones tropicaux créent des conditions dépressionnaires favorables à l'ascendance des masses d'air et apportent beaucoup de vapeur d'eau qui alimente cette instabilité. De plus, les cyclones tropicaux peuvent générer eux-mêmes de fortes pluies résiduelles au Québec (effet rémanent). Ce fut le cas du reste de l'ouragan Carol en 1954 qui provoqua des graves inondations au Québec.

4.3.3. La température

La quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère dépend de la température de l'air. Plus l'air est chaud, plus il contient de vapeur d'eau. Ainsi, un air humide et chaud peut générer de fortes précipitations. Outre cette relation, la température peut influencer de différentes manières la magnitude de crues selon la saison.

(i) En hiver, la différence de température entre l'air froid et l'air chaud détermine la puissance des perturbations génératrices des précipitations. Par ailleurs, la température au moment de la fonte de neige influence la magnitude de crues au printemps. Si la fonte est très rapide, la magnitude de crues augmente et vice versa. Toutefois, une température élevée favorise une évaporation rapide de la neige diminuant ainsi la quantité d'eau qui devrait ruisseler en surface.

(ii) En automne, la température influence la puissance des mouvements convectifs. Plus ces mouvements sont puissants, plus ils généreront de puissants orages qui déverseront de grandes quantités d'eau au sol.

4.3.4. Les états de surface et l'usage des sols

Les états de surface jouent un rôle sur la magnitude des crues surtout en automne. Ils influencent la quantité d'eau qui ruisselle en surface et qui génère les crues. Lorsque ces états sont favorables au ruissellement, la magnitude des crues augmente. Ceci est lié aux modifications provoquées par les activités anthropiques (urbanisation, déforestation, agriculture, etc.). Ces états de surface concernent aussi l'eau contenue dans le sol. Si le sol est déjà gorgé d'eau, les pluies qui y tombent génèrent un ruissellement important susceptible de provoquer des fortes inondations.

Quant à l'usage des sols, une déforestation ou une reforestation affecte le cycle hydrologique dans un bassin versant. En ce qui concerne les débits de crue, l'influence de ces facteurs fait l'objet de controverse dans la littérature scientifique (e.g. Andréassian, 2004; Cosandey et al., 2005; Farley et al., 2005; Haddeland et al., 2007). Au Québec, Muma (2008) a analysé l'influence du couvert forestier (déforestation) sur la variabilité interannuelle des crues et des étiages. Il conclut que le pourcentage du couvert forestier dans un bassin versant n'affecte pas la variabilité interannuelle des débits de crues et d'étiage.

Il s'ensuit que la variabilité de crues et d'étiage est principalement influencée par les facteurs climatiques malgré la déforestation de certains bassins versants.

4.4 Relation entre les indices climatiques et la variabilité temporelle des fortes crues au printemps et en automne au Québec méridional

Les trois premiers facteurs qui influencent la quantité des précipitations et, par corollaire, la magnitude des débits sont influencés à leur tour par la circulation atmosphérique générale. Celle-ci est caractérisée notamment par les indices climatiques.

Au Québec, plusieurs travaux se sont intéressés à l'analyse de la relation entre les variables hydroclimatiques et les indices climatiques. Cependant, la plupart de ces travaux se sont limités au niveau de l'interprétation statistique des résultats. Peu de travaux portent sur les mécanismes climatiques et météorologiques par lesquels ces différents indices climatiques influencent ces variables. Parmi les indices climatiques considérés comme facteurs de variabilité spatio-temporelle des variables hydroclimatiques au Québec, on peut citer ONA, OA, PNA et OAU. Cependant, les mécanismes climatiques par lesquels ces indices influencent les débits ne sont pas encore clairement élucidés.

En ce qui concerne l'indice OAU, Anctil et Coulibaly (2004) ont observé une corrélation négative entre cet indice et les débits moyens annuels en rive sud seulement. En revanche, nos résultats ont démontré que cet indice (indice automnal) est aussi corrélé aux rivières de la rive nord. Néanmoins, ce sont les rivières de la rive sud qui sont mieux corrélées à cet indice. Mais cette corrélation est plutôt positive. Les mécanismes climatiques sur lesquels repose cette influence ne sont pas bien élucidés. Selon Shabbar et al. (1997), les épisodes El Nino/OAU sont associés à une diminution des précipitations et une hausse des températures dans la partie méridionale du Canada (incluant le

Québec méridional) en hiver. Cette relation a été confirmée en partie par l'étude de Higgins et al. (2002) en ce qui concerne la température. En effet, ces auteurs ont montré que pendant les épisodes El Niño/OAU, l'air polaire reste constamment confiné vers le nord du continent nord américain permettant ainsi l'invasion de l'air doux sur une grande partie du Canada méridional en hiver. Ceci expliquerait la hausse de la température en hiver. Mais quant aux précipitations, on devrait plutôt s'attendre à une hausse aussi du fait de la fréquence des vents du sud et du sud-ouest au Québec. Car, ce sont ces vents qui apportent la grande partie de l'humidité au Québec durant toutes les saisons. Plus ces vents sont fréquents, plus la quantité d'humidité dans l'atmosphère augmente entraînant aussi l'augmentation des précipitations aussi bien hiver qu'en automne. Ceci expliquerait la corrélation positive observée entre OAU et les crues printanières et automnales au Québec. Par conséquent, contrairement à la relation proposée par Shabbar et al. (1997), il nous semble que le phénomène El Niño/OAU est associé à une hausse de la température et des précipitations au Québec justifiant ainsi la corrélation positive observée entre OAU et les crues printanières et automnales. Dans les deux autres bassins versants du Québec (Baies d'Hudson et d'Ungava), cet indice est corrélé positivement aux débits moyens annuels (Déry et Wood, 2005). Ceci corrobore nos résultats.

Quant aux indices OA et ONA, ils sont souvent considérés comme les deux principaux facteurs climatiques de la variabilité temporelle des variables hydroclimatiques au Québec. Il convient de préciser d'emblée qu'il existe une controverse sur le lien entre ces deux indices. Pour certains auteurs, ONA est tout simplement une expression régionale d'OA alors que pour d'autres, les deux facteurs sont différents. Toutefois, les deux indices climatiques sont généralement corrélés. Cette corrélation est plus forte en hiver que durant les autres saisons. L'influence d'OA et de ONA sur les débits moyens annuels au Québec a été mise en évidence aussi bien dans le bassin versant de Saint-Laurent (Assani et al., 2008; Anctil et Coulibaly, 2004) que dans les deux autres

de Baies d'Hudson et d'Ungava par plusieurs auteurs (Assani et al., 2006; 2008a; Dery et Wood, 2004; 2005). Dans ces trois bassins versants, OA est corrélée négativement aux débits moyens annuels. Nos résultats révèlent que cet indice peut être corrélé positivement ou négativement aux crues aussi bien au printemps qu'en automne. Ce qui rend malaisée l'interprétation de son influence sur les crues. Kingston et al. (2006) ont décrit les mécanismes climatiques par lesquels cet indice influence la variabilité temporelle des variables hydroclimatiques dans la partie nord orientale du continent nord américain. En effet, selon ces auteurs, lorsque l'indice OA est en phase positive, on observe une hausse de fréquence de l'air froid polaire dans les régions orientale et nord-orientale du Canada provoquant ainsi une diminution de la température et des précipitations. Durant la phase négative de cet indice, on assiste, au contraire, à une invasion de l'air doux et humide provenant du sud ou de l'océan Atlantique à l'origine des fortes précipitations et de températures élevées hivernales. Ce mécanisme explique la corrélation négative observée entre cet indice et les débits. Toutefois, selon Kingston et al. (2006), cette relation s'inverse dans le nord-est des États-Unis, région qui est contiguë au Canada. Ainsi, OA est corrélée positivement aux variables hydrolimatiques dans cette région. Ceci expliquerait le fait que cet indice soit corrélé positivement à certaines rivières mais négativement à d'autres au Québec, et ce en particulier en rive sud.

Enfin, OAM et ODP sont deux indices très corrélés mais dont les phases sont opposées (McCabe et al., 2004). La phase positive de l'un correspond à la phase négative de l'autre. Au Québec, Dery et Wood (2005) n'ont pas observé un lien entre ODP et les débits moyens annuels dans la région arctique. Quant à Assani et al. (2008d), ils ont observé une corrélation négative entre OAM et les débits moyens annuels en rive sud. Cette corrélation a été observée sur une grande partie des États-Unis et au Mexique (e.g. Curtis, 2008; Enfield et al., 2001, McCabe et al., 2004). Ceci corrobore nos résultats. En effet, cet indice est corrélé négativement aux crues printanières et automnales sur les deux rives.

Cette corrélation négative a été attribuée à l'influence d'OAM sur le transfert de l'humidité entre le continent et l'Océan Atlantique. Durant la phase positive de cet indice, les vents d'ouest deviennent très fréquents au-dessus du continent nord-américain limitant ainsi le transfert de la vapeur d'eau de l'Océan vers le continent. Il en résulte une diminution des précipitations à l'intérieur du continent. Toutefois, au niveau de la côte, les précipitations augmentent inversant ainsi la relation entre OAM et les variables hydroclimatiques. Durant la phase négative, ce transfert s'intensifie provoquant une hausse des précipitations et des débits à l'intérieur du continent en raison de l'affaiblissement des vents d'ouest. Ceci pourrait expliquer la hausse de fortes crues printanières observée en rive nord où cet indice est mieux corrélé aux débits. En effet, depuis 1970, OAM est en phase négative, phase durant laquelle les précipitations et les débits augmentent à l'intérieur du continent nord américain.

Enfin, il importe de souligner le fait que la corrélation entre un indice climatique et les variables hydroclimatiques peut se modifier dans le temps comme l'ont démontré plusieurs travaux réalisés au Québec (Anctil et Coulibaly, 2004; Coulibaly et Burn, 2004; 2005).

CHAPITRE 5

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Il ressort de cette étude quatre conclusions majeures suivantes :

1. Il existe une opposition dans la variabilité interannuelle des crues printanières et automnales entre les deux rives du fleuve. Par conséquent, la variabilité temporelle de crues n'est pas synchrone à l'échelle de tout le bassin versant de Saint-Laurent. Cet aspect doit être pris en compte dans la prévision de crues par les modèles climatiques.
2. La variabilité temporelle des crues printanières et automnales au cours du siècle passé n'a révélé aucun indice susceptible d'étayer l'influence du réchauffement climatique actuel sur les régimes de crues. En effet, seules les crues printanières de rivières de la rive nord ont connu une hausse significative de leur magnitude. Cette conclusion rejoint celle de Kundzewicz et al (2005) tirée d'une étude basée sur l'analyse de 195 rivières réparties sur les cinq continents.
3. Les crues printanières et automnales ne sont pas influencées par les mêmes indices climatiques sur les deux rives du fleuve.
4. L'existence de corrélation significative entre les crues et les indices climatiques durant les deux saisons permet de prédire la variabilité temporelle des crues. Toutefois, cette prédiction est meilleure pour les rivières de la rive sud que celles de la rive nord, en particulier celles situées au nord du 47ème parallèle.

BIBLIOGRAPHIE

Afifi A.A., Clark V., 1996. Computer-aided multivariate analysis .3rd edition. Chapman and Hall. New York. 505p.

Anctil, F., Martel, N., Hoang, V.D. (1998) « Analyse régionale des crues journalières de la province de Québec », Canadian Journal of Civil Engineering, 25: 360-369.

Anctil, F., Coulibaly, P. (2004) "Wavelet analysis of the interannual variability in southern Québec streamflow", Journal of Climate, 17: 163-173.

Anctil, F., Mathevet, T. (2004) « Influence de la taille des régions homogènes sur la qualité de l'ajustement des crues de rivières non jaugées du Québec », Canadian Water Resources, 29: 47-58.

Andréassian, V. 2004. Waters and forest : from historical controversy to scientific debate. Journal of Hydrology, 291: 1-27.

Ashkar, F., Rousselle, J. (1981) "Design Discharge as a Random Variable: A Risk Study" Water Resources Research, 17: 577-591.

Assani, A.A., Gravel E., Buffin-Bélanger T., Roy A.G. (2005) « Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada) », Revue des sciences de l'eau, 18: 103-127.

Assani, A.A., Tardif S. (2005) « Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec (Canada). Approche éco-géographique », Revue des sciences de l'eau, 18: 247-266.

Assani, A.A., Tardif S., Benseghir S., Chalifour A. et Mhamed M. (2006) « Développement d'une nouvelle méthode de régionalisation basée sur le concept de régime des débits naturels : La méthode éco-géographique », Revue des Sciences de l'Eau, 19 : 395-380.

Assani, A.A., Tardif S., Lajoie F. (2006) "Statistical analysis of factors affecting the spatial variability of annual minimum flow characteristics in a cold temperate continental region (Southern Québec, Canada)", *Journal of Hydrology*, 328: 753-763.

Assani, A.A., Lajoie, F., Vadnais, M-E., Benseghir, S., Bureau, C. 2006. Modes de variabilité temporelle des débits moyens annuels et leurs liens avec les indices climatiques au Québec (Canada). *Géographie Physique et Quaternaire*, 60, 215-224.

Assani, A.A., Lajoie F., Laliberté C. (2007) « Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels en fonction du mode de gestion et de la taille des bassins versants au Québec », *Revue des Sciences de l'Eau*, 20: 127-146.

Assani, A.A., Lajoie, F., Vadnais, M-E., Beauchamp, G. 2008a. Analyse de l'influence de l'oscillation arctique sur la variabilité interannuelle des précipitations dans le bassin versant de la rivière Saint-François (Québec, Canada) au moyen de la méthode des corrélations canoniques. *Revue des Sciences de l'Eau*, 21, 21-33.

Assani, A.A., Tardif, S., Lajoie, F., Chalifour, A. 2008b. Application of the « Natural flow regime » concept to the development of a comprehensive streamflow analysis approach. Example of annual maximum spring flood in southern Québec. In : *Focus on Water Resources Research* (Ed.) E. Hakkinen, pp235-259.

Assani, A.A., Lajoie, F., Roy, A.G., Frenette, J.J. 2008c. Relationships between Summer-Fall precipitation, climatic indices, and hurricanes in Québec (Canada). *International Journal of Climatology* (Soumis).

Barlow, M., S. Nigam, E.H. Berbery. 2001. ENSO, Pacific Decadal variability, and U.S. Summertime precipitation, drought, and stream flow. *Journal of Climate*, 14: 2105-2128.

Cook, E.R., R. Seager, M.A. Cane, D.W. Stahle. 2007. North American drought: Reconstructions, causes, and consequences. *Earth-Science Reviews*, 81: 93-134.

Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J.F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N., Richard, D. 2005. The hydrological impact of the Mediterranean forest: a review of French research. *Journal of Hydrology*, 301: 235-249.

Bigot, S., Camberlin P., Moron V., Richard Y. (1997) « Structures spatiales de la variabilité des précipitations en Afrique : une transition climatique à la fin des années 1960 ? », *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris (série II a)*, 324: 181-88.

Burn D.H, Hag Elnur, M.A., 2002. Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology* 255: 107-122.

Cavadias, G.S. 1990. The Canonical Correlation Approach to Regional Flood Estimation in: *Regionalization in Hydrology*. International Association of Hydrological Sciences, 191: 171-178.

Coulibaly, P., Burn D.H. (2004) "Wavelet analysis of variability in annual Canadian streamflows", *Water Resources research*, 40: W03105.

Coulibaly, P., Burn, D.H. (2005) "Spatial and temporal variability of Canadian seasonal streamflows", *Journal of Climate*, 18: 191-210.

Daviau, J.L., Adamowski, K., Patry, G.G. 2000 "Regional flood frequency analysis using GIS, L-moment and geostatistical methods", *Hydrological processes*, 14: 2731-2753.

Desforges, P., Tremblay, R. 1974 « Analyse de la fréquence des crues pour le Québec », Gouvernement du Québec, Ministère des richesses naturelles, Direction générale des eaux.

Eaton, B., Lapointe, M. 2002. Effects of large floods on sediment transport and reach morphology in the cobble-bed Sainte-Marguerite River. *Geomorphology*, 40: 291-309.

El-jabi, N., Ashkar, F., Rousselle, J. (1986) « Étude stochastique des crues au Québec », Gouvernement du Québec, Ministère de l'environnement, Direction des relevés aquatiques.

Elsner, J.B., 2006, Evidence in support of the climate change-Atlantic hurricane. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L16705, Doi:10.1029/2006GL026869

Elsner, J.B., P.J. Murname, T.H. Jagger, 2006, Forecasting US hurricanes 6 month in advance. *Geophys. Res. Lett.*, 33 Art. No. L10704.

Emmanuel, K.A., 2005, Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436: 686-688.

Enfield, D.B., Mestas-Nunes, A.M., Trimble P.J. (2001) "The Atlantic multidecadal oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S.", *Geophysical research letters*, 28: 2077-2080.

Farley, K., Jobbagy, E.G., Jackson, R.B. 2005. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*, 11, 1565-1576.

Fortier, C., Assani, A.A., Mesfioui, M.; Roy, A.G. 2008. Impact of inversion of the hydrologic regime by a dam on the temporal variability of seasonal heavy floods and their correlation to climate indices in Québec (Canada). Case study of the Matawin River. *Soumis au Journal of Hydrology*.

Gingras, D., Adamowski, K., Pilon, P.J. (1994) "Regional flood equations for the provinces of Ontario and Quebec", *Water Resources Bulletin*, 30: 55-67.

Gobena, A.K., Gan, T.Y. (2006) "Low-frequency variability on Southwestern Canadian streamflow: links with large-scale climate anomalies", *International journal of Climatology*, 26: 1843-1869.

Goldenberg, S.B., C.W. Landsea, A.M. Mestas-Nunez, and W.M Gray, 2001, the recent increase in Atlantic hurricane activity: causes and implications. *Science*, 293: 474-479.

Goodrich, G.B. 2007. Multidecadal climate variability and drought in the United States. *Geography Compass*, 1-4, 713-738, doi:10.1111/j.1749-8198.2007.00035.

Grehys. 1996a. "Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis", *Journal of Hydrology*, 186: 63–84.

Grehys. 1996b "Inter-comparison of regional flood frequency procedures for Canadian rivers", *Journal of Hydrology*, 186: 85–103.

Groisman, P.Y., Easterling D.R. (1994) "Variability and Trends of Total Precipitation and Snowfall over the United States and Canada", *Journal of climate*, 7: 184-205.

Guay, J.C., Boisclair, D., Rioux, D., Leclerc, M., Lapointe, M., Legendre, P. 2000. Development and validation of numerical habitat models for juvenile of atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57: 2065-2075.

Haché, M., Ouarda, T.B.M.J., Bruneau, P., Bobée, B. (2002) « Estimation régionale par la méthode de l'analyse canonique des corrélations : comparaison des types de variables hydrologiques », *Canadian journal of civil engineering*, 29: 899-910.

Haddeland, I., Skaugan, T., Lettenmaier, P. 2007. Hydrologic effects of land and water management in North America and Asia: 1700-1992. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 11: 1035-1045.

HOANG V.D. (1977) « Estimation des débits journaliers de crue printanière des rivières du Québec méridional. », *Ministère des Richesses naturelles du Québec*, H.P.40, 43p.

Higgins, R.W., Leetman, A., Kousky, V.E. 2002. Relationships between climate variability and winter temperature extremes in the United States. *Journal of Climate*, 15, 1555-1572.

Hoang, V.D. (1978) « Meilleurs ajustements statistiques aux débits journaliers de crue et d'étiage des rivières du Québec. », *Ministère des Richesses Naturelles du Québec*. H.P. 47, 28p.

Hoyos, C.D., P.A Agudelo, P.J. Webster, J.A Curry, 2006, Deconvolution of the factors contributing to the increase in global hurricane intensity. *Science*, 312, 94-97.

KINGSTON, D.G. (2006). "Linkages between atmospheric circulation, climate and streamflow in the northern North Atlantic: research prospects", *Progress in physical geography*, 30: 143-174.

Kundzewics, Z.W., Graczyk, D., Maurer, T., Pinskiwar, I., Radziejewski, M., Svensson, C., Szwed, M. 2005. Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow. *Hydrological Sciences Journal* 50, 797-810.

Landsea, C.W., 2005, Meteorology-Hurricanes and global warming. *Nature*, 438, E11-E13.

Lapointe, M., Eaton, B., Driscoll, S., Latulippe, C. 2000. Modeling the probability of salmonid egg pocket scour due to floods. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57: 1120-1130.

Laurencelle, L. 2001. « Hasard, nombres aléatoires et méthodes Monte Carlo. », Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, Québec, 264p.

Mauget, S.A. 2003a. Intra-to multidecadal climate variability over the Continental United States: 1932-99. *Journal of Climate*, 16, 2215-2231.

Mauget, S.A. 2003b. Multidecadal regime shifts in U.S. streamflow, precipitation, and temperature at the end of the Twentieth Century. *Journal of Climate*, 16, 3905-3916.

McCabe, G.J., Palecki M.A., Betancourt J.L. (2004) "Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States", *Proceedings of the national academy of science*, 101: 4136-4141.

Muma, M. 2008. Analyse de la variabilité spatio-temporelle des crues et d'étiages en fonction de l'usage des sols au Québec méridional. Mémoire de maîtrise en sciences de l'environnement, UQTR.

Ouarda, T.B.M.J., Rasmussen, P.F., Cantin, J.-F., Bobée, B., Laurence, R., Hoang, V.D., Barabé, G. (1999) « Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec », *Revue des sciences de l'eau*, 12: 425-448.

Pielke, R.A.J., 2005. Are there trends in hurricane destruction? *Nature*, 438, p.E11

Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B., Sparks, R., Stromberg, J. (1997) "The natural flow regime: a new paradigm for riverine conservation and restoration", *BioScience*, 47: 769-784.

Ribeiro-Corréa, J., Cavadias, G.S., Clément, B., Rouselle, J. (1995) "Identification of hydrological neighborhoods using canonical correlation analysis", *Journal of Hydrology*, 173: 71-89.

Richter, B.D., BAUMGARTNER J.V., POWELL J., BRUAN D.P. (1996) "A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems", *Conservation biology*, 10: 1163-1174.

Roy, L., Leconte, R., Brisette, F.P., Marche, C. (2001) "The impact of climate change on seasonal floods of a southern Quebec River Basin", *Hydrological processes*, 15: 3167-3179.

Schubert, S.D., Suarez, M.J, Pegion, P.J., Koster, R.D., Bacmeister, J.T. 2004. Causes of long-term drought in the U.S. Great Plains. *Journal of Climate*, 17, 485-503.

Shepherd, J.M, Knuston, T. 2007. The current debate on the linkage between global warming and hurricanes. *Geography Compass*, 1, 1-24.

Siew-Yan-Yu, T.O., Rousselle, J., Jacques, G., Nguyen, V.T.V. (1998) « Régionalisation du régime des précipitations dans la région des Bois-francs et de l'Estrie par l'analyse en composantes principales », *Canadian journal of Civil Engineering*, 25: 105-1058.

Small, S.I., Vogel, R.M. (2006) "Trends in precipitation and streamflow in the eastern U.S.: Paradox or perception?", *Geophysical Research Letters*, 33: L03403.

Sneyers, R. 1975. « Sur l'analyse statistique des séries d'observations. In WMO Technical Note, World Meteorological Organization, 143: 186p.

Stone, M.C., Hotchkiss, R.H., Hubbard, C.M., Fontaine, T.A., Mearns, L. O., Arnold, J.G. (2002) "Impacts of climate change on Missouri river basin water yield", *Journal of the American Water Resources Association*, 37: 1119-1129.

Sutton, R.T., Hodson, D.L.R. (2005) "Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate", *Science*, 309: 115-118.

Vicente-Serrano, S.M. (2005) "El Niño and La Niña influence on droughts at different timescales in the Iberian Peninsula.", *Water Resources Research*, 41, W12415.

Viles, H.A., Goudie A.S. (2003) "Interannual, decadal and multidecadal scale climatic variability and geomorphology", *Earth-Science Reviews*, 61: 105-131.

Walsh, K. 2004. Tropical cyclones and climate change: unresolved issues. *Climate Research*, 27, 78-83.

Webster, P.J., G.J. Holland, J.A. Curry, and H-R., Chang, 2005, changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 309, 1844-1846.

Yue, S., Pilon P., Phinney B., Cavadias G. (2001) "Patterns of trend in Canadian streamflow" present In 58th eastern snow conference in Ottawa, Ontario, Canada.

Yue S., Wang C.Y. (2002) "Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test", *Water resources research*, 38: 1068p.

Zhang, X., Harvey D.K, Hogg W.D & Yuzyk T.R. (2001) "Trends in Canadian streamflow." *Water Resources Research* 37: 987-998.

Zhang, D., and A. Sun. (2000) "Stochastic analysis of transient saturated flow through heterogeneous fractured porous media: A double-permeability approaches", *Water Resource Research*, 36: 865–874.